

# 환형소결체 하나로 조사시험용 무계장 리그의 차압 및 유동유발 진동시험 Pressure Drop and Flow-Induced Vibration Test for the HANARO Non-instrumented Irradiation Test Rig of Annular Fuel Pellet

이강희\* · 김대호\* · 방제건\*

Kang-Hee Lee, Dae-Ho Kim, Jae-Gun Bang

**Key Words** : 무계장 조사시험용 리그(Non-instrumented Irradiation Test Rig), 압력강하(Pressure Drop), Flow-Induced Vibration(유동유발 진동), 이중냉각 소결체(Dual-Cooled Fuel Pellet), 노외시험(Out-pile Test), Operational Requirement(운전요건)

## ABSTRACT

Needs of fuel's performance evaluation for the dual-cooled fuel pellet (annular shape) necessitate the irradiation test in the test reactor. Irradiation test rig for the HARARO reactor, which is a special-purposed equipment used for material, irradiation and creep test, must satisfy the operational requirement on the hydraulic characteristics and structural integrity. In this paper, pressure drop and flow-induced vibration test for the newly developed non-instrumented test rig were carried out using FIVPET as a out-pile evaluation test. The test results show that the new test rig satisfy the HANARO operational requirement with sufficient margin. The spectral response characteristics of the flow-induced vibration of the test rid were also discussed.

## 기 호 설 명

$A_1 \sim A_4$ : 위치에 따른 유로단면적,  $D_1 \sim D_4$ : 위치에 따른 수력 직경,  $DP$ : 압력강하,  $f_2 \sim f_4$ : 위치에 따른 와류여기 주파수,  $pp$ : 최대 · 최대 진폭,  $P_{in}$ : 입구압력,  $P/S$ : 펌프속도,  $Q_m$ : 입구유량,  $rms$ : rms진폭,  $St$ : Strouhal 수,  $T$ : 순환유체온도,  $V_{av}$ : 평균유속,  $V_1 \sim V_4$ : 위치에 따른 평균유속

## 1. 서 론

한국원자력연구원에서 초고연소도 고성능핵연료기술개발의 일환으로 수행중인 환형 핵연료 소결체의 노내 조사시험을 위해서, 새로운 조사시험용 리그(Irradiation Test Rig)가 개발되었다. 조사시험 리그는 국내 연구용 원자로인 하나로(HANARO)를 이용한 재료 및 핵연료(nuclear fuel), 크립시험과 같은 특수 목적의 조사시험을 수행하는데 이용되는 조사리그(irradiation rig)의 하나이다<sup>(1)</sup>. 상기 조사시험을 수행하기 위해서는 정상 운전 중 시험핵연료를 장전한 상태의

시험리그가 원자로 일차냉각계의 설계기준이 되는 구조적 건전성과 열수력학적 요구조건<sup>(1)</sup>에 대한 만족여부를 노외 실증실험을 통해서 입증하고, 이로부터 원자로의 안전성을 확보해야 한다. 시험리그의 노외 실증실험 항목으로는 압력강하 실험, 진동실험 및 내구성실험 등이 있다. 대부분의 노외 실증실험은 시험용 원자인 하나로의 실제 운전조건과 동일한 온도, 압력 및 유량조건에서 실시되어야 하고, 시험리그의 차압측정 결과로부터 원자로 노심과의 수력학적 양립성을 입증한다. 아울러, 진동실험 및 내구성실험을 통하여 시험리그가 장시간동안 장전되어 운전되었을 때, 유동유발(Flow-Induced) 진동에 의해 마모(Wear)가 발생하는지 여부를 실험적으로 규명하여 이중냉각 환형소결체의 시험리그 및 시험에 적용되는 조사공 내 유동관(Flow Tube)의 건전성을 확인해야 한다<sup>(2)</sup>.

본 연구에서는 상기 이중냉각 환형 소결체의 하나로 조사시험을 위해 개발된 무계장 리그의 상기 하나로 운전 제한조건을 만족하는지를 확인하고 이에 따른 건전성 여부를 평가하기 위하여, FIVPET 수력시험장치를 이용한 차압측정 시험과 유발유발 진동시험을 수행하였다. FIVPET(Flow Induced Vibration and Pressure drop Experimental

† 이강희, 한국원자력연구원 선진경수로연료개발센터  
E-mail : leekh@kaeri.re.kr  
Tel : (042) 868-2298, Fax : (042) 863-0565

\* 한국원자력연구원 선진경수로연료개발센터

1) 정상운전조건에서, OR 조사공 압력강하 200 kPa 이상으로 유지, OR 조사공 최대유량이 12.7 kg/s 이하로 유지, 리그 최대 진동진폭 300 $\mu$ m(OR 조사공 벽과의 간극)이하로 유지.

Tester)는 핵연료 구조 부품의 구조적·수력적 성능을 집합체 단위로 시험·확인하기 위한 수력 시험장치<sup>(3)</sup>로, 고성능 지지격자개발의 일환으로 구축되었으며, 본 시험을 위하여 조사시험 리그와 OR 조사공에 구조·수력적으로 양립하도록 기존 시험부를 적절히 개조하였다. 본 연구는 하나로 조사리그의 차압 및 진동시험에 대하여 FIVPET 시험장치를 이용하는 국내 최초의 시도이며, 시험의 절차와 방법, 그리고 개괄적인 결과에 관해 소개함에 그 목적이 있다.

## 2. 시험시설 및 조사시험 리그

### 2.1 FIVPET 시험장치

조사시험 리그의 차압 및 유동유발 진동시험을 위하여 이중냉각핵연료 구조설계기술개발에서 현재 운용 중인 FIVPET 시험시설을 이용하였다. Fig. 1은 FIVPET의 개략도를 도시한다. FIVPET 시설은 5x5 부분 핵연료집합체를 대상으로 노심 유속조건에서 집합체의 진동과 부수로 유동의 수력특성(차압, 유량 등)을 측정하여, 핵연료 구성부품 단위의 설계특성을 평가하기 위한 시험장치이다. 따라서, 이중의 시험체인 조사리그에 대한 수력시험을 위해서는 별도의 유동시험부를 새로 제작하여야 한다. 조사리그의 수력시험을 위한 유동시험부는 하나로 조사공을 모사하면서, 리그를 수용할 수 있도록 신규제작하여 FIVPET에 장착하였고, 예비시험을 통하여 리그시험용 시험부의 진동 및 수력특성을 확인하였다. Fig. 2는 시험에 사용된 이중냉각 환형 소결체용 조사리그를 나타낸다.

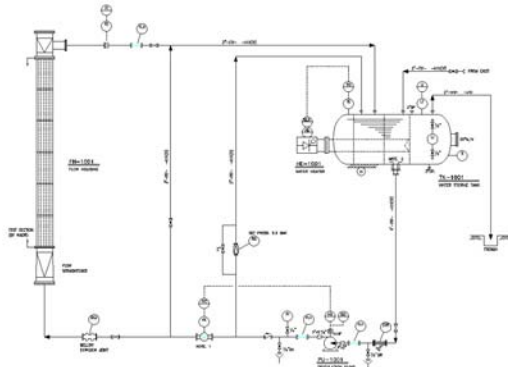


Fig. 1 Schematic diagram of the FIVPET facility

### 2.2 장치예비 성능시험

FIVPET 장치와 신규 제작된 유동시험부의 성능을 확인하고, 시험부에 리그가 설치되지 않은 조건에서 시험부가 갖는 운전중 진동특성에 대한 기초데이터를 확보하기 위한 목적으로 아래와 같이 루프와 시험부에 대한 예비수력시험을 수행하였다. 성능시험은 최대 펌프 회전수 810 rpm까지 단속적으로 펌프 회전수를 증가시키면서, 각 펌프회전수 일 때 입·출구 배관에서의 유량, 압력, 온도, 리그 상입부 입·출

구 차압을 측정하고, 리그 하우징의 주요 위치에서의 진동을 비접촉식 레이저 진동계를 이용하여 측정하였다. Table 1은 시험부 중심에 고정되고, 리그 삽입부 상단에 측정된 시험결과를 요약하여 제시하고 있다. Fig. 3은 시험관 중심부의 구속여부와 진동측정 위치에 따른 시험부의 유동유발 진동진폭을 도시한다. 구속된 위치가 시험관 중심에 가까울수록 진동진폭은 감소하며, 리그 하우징 상단 진동진폭은 최대 유속에서 rms 진폭이 1  $\mu\text{m}$  이하로 측정되어 진동시험부의 운전중 기본 진동 수준은 진동진폭 관점에서 안정적이라고 볼 수 있다. Fig. 4는 유동시험부의 유동유발 진동 스펙트럼을 도시한다. 유동조건에 따른 시험부 하우징의 주요한 유동유발 주기 성분은 7 Hz, 28 Hz, 49 Hz 정도로 파악되며, 시험부 및 시험부 주변 배관의 모달 주파수로 판단된다. 순환 펌프 임펠러의 회전에 의한 회전맥동 주파수 성분은 지배적인 주기성분에 비해 상대적으로 작은 에너지를 갖는다. 이로부터 조사리그의 진동응답에 대한 유동에 내재한 주기적인 잡음 성분이 미치는 영향이 미미할 것으로 판단된다.

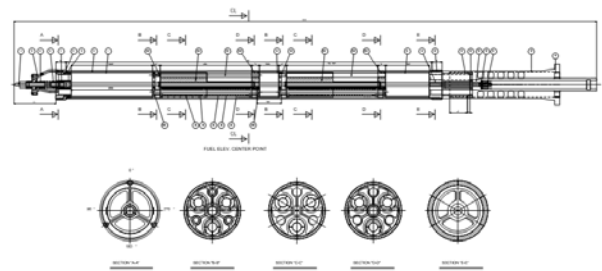
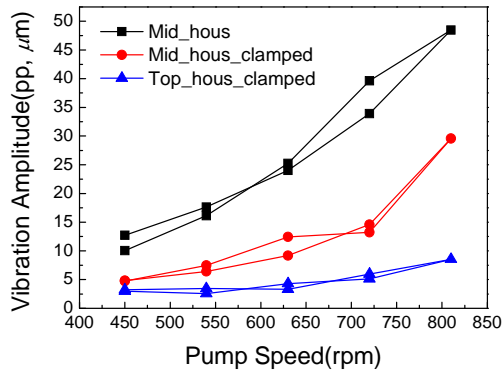


Fig. 2 Drawing of Non-instrumented Irradiation Test Rig

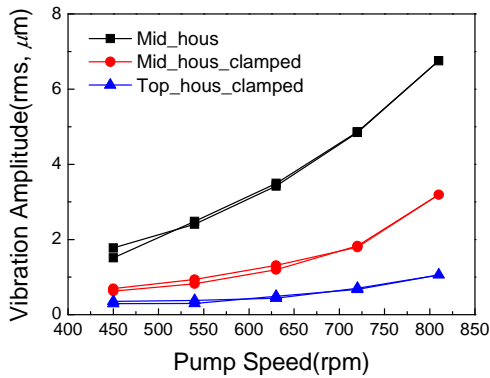
Table 1. Hydraulic parameters and housing vibration according to the pump speed(Clamping tool position : middle of test section, LDV measurement location : top of Rig test section)

P/S (rpm)	P/S (Hz)	$Q_{in}$ (kg/s)	$P_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	DP (kPa)	T (°C)	$V_{ave}$ (m/s)	$\delta_{housing}$	
							pp ( $\mu\text{m}$ )	rms ( $\mu\text{m}$ )
450	15	18.68	0.58	34.8	31.31	2.20	2.986	0.294
540	18	22.90	0.7	50.6	31.31	2.69	2.536	0.3
630	21	26.65	0.84	69.5	31.4	3.13	4.311	0.49
720	24	30.56	1.01	92.3	31.45	3.59	5.143	0.674
810	27	33.72	1.24	119.5	31.5	3.97	8.543	1.059
720	24	30.80	1.01	92.2	31.56	3.62	5.963	0.7
630	21	26.98	0.84	69.4	31.56	3.17	3.325	0.44
540	18	22.83	0.69	50.6	31.61	2.69	3.45	0.379
450	15	18.77	0.58	34.5	31.62	2.21	3.228	0.358

Note)  $\delta_{housing}$  : vibration amplitude of the rig housing.



(a) peak to valley



(b) root mean square

Fig. 3 vibration amplitude of the rig housing measured at 1) middle of the housing without clamping tool for test section, 2) middle of the housing with clampint tool , 3) top of the housing with clamping tool.

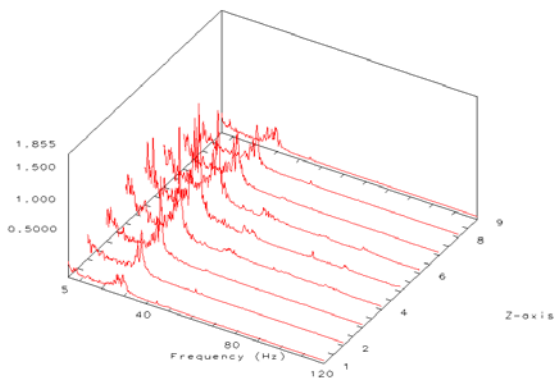


Fig. 4 Vibration spectrum of the rig housing measured at the middle of housing with clamping tool.

### 3. 시험결과

#### 3.1 조사 리그 유동시험 조건 및 압력강하

Table 2는 이중냉각 핵연료를 장착한 조사리그를 대상으로 수행된 수력시험에서, 시험부 입구에서 측정된 각각의 유동 데이터와 입·출구의 차압측정 결과를 나타낸다. 유동조건은 펌프의 회전속도에 따라 일정하게 증가시키면서 수행되었고, 최대 시험부의 차압이 250 kPa 이하일 때까지 upward 및 downward 방향으로 반복 시험하였다. Table에 제시된 시험유속은 시험리그에 의해 감소된 유동단면적이 리그 없는 시험부 단면적의 2/3가 된 경우를 근거로 계산된 평균유속이다. Fig. 5는 유량에 따른 시험부 입출구의 차압을 도시한다. 상기의 결과로부터 약 200 kPa의 압력강하를 유발하는 유량은 8.27 kg/s이며, 하나로 운전 제한 조건인 12.7 kg/s 이하를 만족한다.

Table 2 Test flow condition

$P/S$ (rpm)	$Q_{in}$ (kg/s)	$P_{in}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$DP$ (kPa)	$T$ (°C)	$V_{ave}^{*)}$ (m/s)
570	5.02	1.14	75.4	41.0	5.35
660	5.95	1.42	104.8	41.0	6.34
750	6.99	1.75	139.0	41.0	7.44
840	7.93	2.12	177.4	41.0	8.45
900	8.51	2.39	204.9	41.1	9.06
960	9.19	2.67	235.1	41.1	9.79
900	8.56	2.39	205.6	41.1	9.12
840	7.99	2.12	177.6	41.1	8.51
750	7.01	1.75	138.9	41.1	7.46
660	5.99	1.42	105.1	41.1	6.38
570	5.02	1.14	75.8	41.0	5.35

\*) when the flow area in the housing is reduced by 2/3 due to the Rig; from the original area without the Rig.

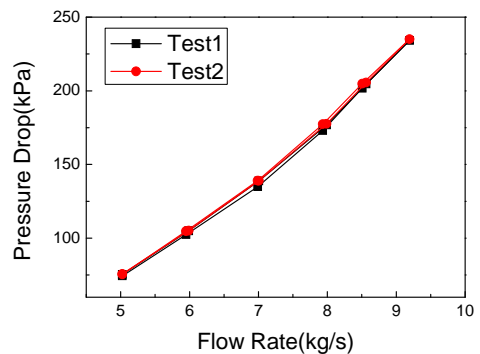


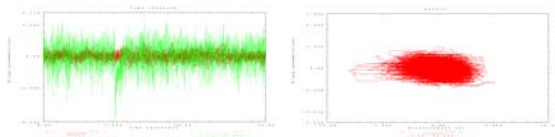
Fig. 5 Pressure drop as a Function of the Flow Rate

### 3.2 진동진폭과 횡방향 궤적

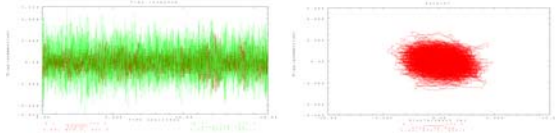
이중냉각 소결체 시험리그에 대한 진동실험은 질량유량 0.5~1.0 kg/s 간격으로 증가시키면서 리그 상단의 Grapple Head에 대하여 90° 간격의 두 직교방향에 대하여 실시되었다. 진동시험결과는 Table 3에 수록하였다. 상기의 실험결과로부터 이중냉각 핵연료용 시험리그의 진동변위는 하나로 운전제한조건인 최대 허용간극 300 μm이하를 만족한다. Fig. 6은 유동조건에 따른 진동응답 시간이력과 리그 횡방향 진동 궤적을 도시한다. 리그의 진동은 시험 질량유량 7.5 kg/s 이상에서 급격히 상승하는 것으로 보인다. 또한, 횡방향 진동궤적은 진동이 작을 때 원형에 가까운 형태를 취하다가, 유량 7.5 kg/s 이상에서 타원형(side방향 혹은 x방향으로 기울어진)의 형태를 갖는다. 아울러, 유량이 증가됨에 따라 리그의 진동신호에 나타난 불안정(unstable)한 ripple은 측정레이저가 지나는 매질의 불안정이나 측정장비 자체의 구조적인 원인 때문인 것으로 생각된다.

Table 3. Vibration Amplitudes of the Test Rig Corresponding to the measurement orientation.

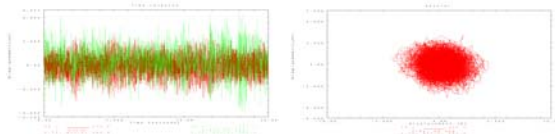
$Q_m(\text{kg/s})$	North Direction		East Direction	
	$pp(\mu\text{m})$	$rms(\mu\text{m})$	$pp(\mu\text{m})$	$rms(\mu\text{m})$
5.02	10.58	1.14	10.585	1.39
5.95	19.9	2.56	18.27	2.39
6.99	46.58	6.663	41.99	5.982
7.93	40.59	5.292	38.98	4.878
8.51	39.897	5.125	33.66	5.0113
9.19	72.54	7.5113	63.607	7.0068
8.56	34.44	5.447	35.62	5.7091
7.99	43.06	5.4877	44.49	5.9785
7.01	58.67	7.2532	56.79	6.9924
5.99	18.189	2.1986	19.979	2.9271
5.02	10.505	1.0677	11.395	1.3236



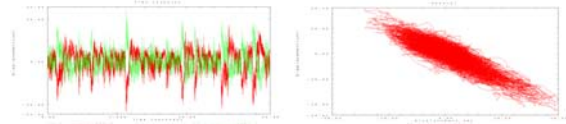
(a)  $Q_m=4.985$  kg/s



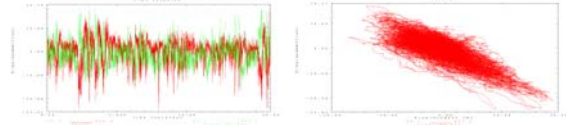
(b)  $Q_m=5.95$  kg/s



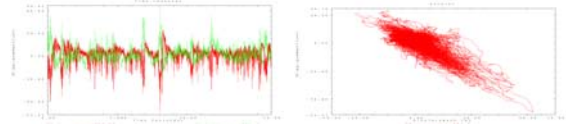
(c)  $Q_m=6.88$  kg/s



(d)  $Q_m=7.77$  kg/s

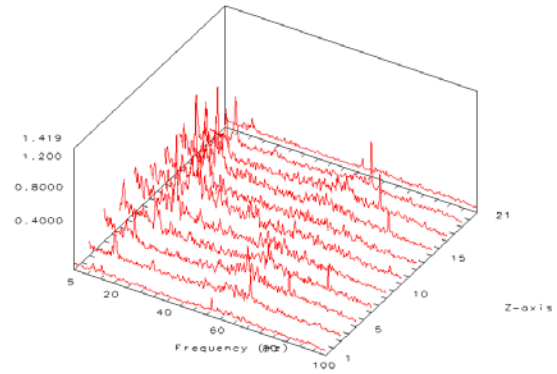


(e)  $Q_m=8.60$  kg/s

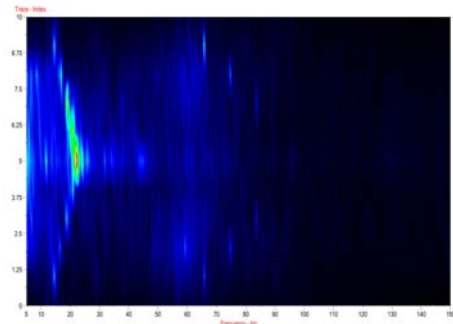


(f)  $Q_m=9.20$  kg/s

Fig. 6 Time history trace of the rig's vibration displacement and its orbital trace.



(a) water fall format



(b) Color map

Fig. 6 Flow-induced vibration spectral map of the Test

### 3.3 유동유발 진동스펙트럼

Fig. 7은 조사 리그의 유동유발 진동에 대한 사시형 및 분광형 스펙트럼 지도를 도시한다. 유량 4.99 및 5.02 kg/s 조건에서 리그의 횡방향 유동유발 진동의 주요 주파수 성분은 15.2Hz, 26Hz, 56.9Hz이며, 각각 리그 내부유로의 절곡부나 불연속 단면에서 발생하는 와류여기, 시험관 기저 고유



(1) Shedding frequency  $f = St^*V/D$

## 후 기

여기서,  $St$ 는 0.17로 가정하였고,  $St$ 는  $Re$ 의 함수이다.  $V$ 와  $D$ 는 각각 유속과 수력직경을 나타낸다.

본 연구는 과학기술부의 원자력 기술개발사업인 초고연소도 고성능 핵연료 기술개발(대과제) 핵연료연소성능평가 기술개발(세부과제)의 일환으로 수행되었다.

Table 5. Comparison between the calculated and the measured vortex shedding frequencies according to the flow rate; the subscript of the frequency corresponds to the subscript of the flow velocity listed in Table 4.

## 참 고 문 헌

$Q_{in}$ (LPM)	$f_2$ (Hz)	$f_3$ (Hz)	$f_4$ (Hz)	Measured freq.(Hz)
302.8	12.60	45.09	20.12	12.24
358.7	14.92	53.41	23.83	14.64
421.2	17.52	62.73	27.98	16.56
478.2	19.89	71.21	31.77	18.72
512.8	21.33	76.37	34.07	20.89
554.2	23.05	82.52	36.81	22.33
516.2	21.47	76.87	34.29	20.41
481.6	20.03	71.71	31.99	19.21
422.3	17.57	62.89	28.06	16.80
360.9	15.01	53.74	23.97	14.64
302.8	12.60	45.09	20.12	15.12

(1) M.-H. Choi, K.-N. Choo, M.-S. Cho, K.-H. Lee and B.-G. Kim, 2005, "Pressure Drop and Vibration Characteristics of the Capsule with a Modification of Bottom Structures", Proceedings of Korean Society of Noise and Vibration Autumn Annual Meeting, pp. 782-787(In Korean).

(2) Hyung-Gil Jun et al, 2001, "Hydraulic Test for Non-instrumented Capsule of Advanced PWR Fuel Pellet", KAERI/TR-1962/2001, pp. 1~10(In Korean).

(3) Kee-Nam Song et al, 2006, "Development of a High Performance Spacer Grid", KAER/RR-2736/2006, pp. 9~77(In Korean).

## 4. 결론

한국원자력연구원에서 설계하고 제작한 이중냉각 환형 소결체의 조사시험을 위해 제작된 무게장 조사시험용 리그에 대한 하나로 OR 조사공의 운전 가능요건의 만족여부를 평가하기 위하여 FIVPET 수력시험장치를 이용한 압력강하 및 진동시험을 수행하였다. 실험결과, 200 kPa의 압력강하를 유발시키는 유량은 8.3 kg/s로 측정되었으며, 리그 진동진폭은 최대 유량조건에서 rms기준 7.5  $\mu$ m, 최대진폭기준 73  $\mu$ m이하로 측정되어, 하나로 OR조사공에 대한 운전가능 요건을 만족함을 알았다. 리그 진동의 주된 주파수 성분은 리그 내부유로의 불연속 단면에서 발생하는 와류여기(10~24Hz), 시험부의 1차 고유진동수(24~26 Hz), 펌프 회전수에 따라 일정하게 증가되는 Blade Passing Frequency(55~90 Hz)로 판단되며, Rig자체의 고유진동수는 상기 주파수 성분 이외의 주파수 밴드에 존재하는 작은 크기의 섭동성분일 가능성이 크다. 참고로, 상기 조사시험용 무게장 리그에 대한 3개월 정도의 내구성 시험이 추가로 요망되며, 이에 대한 FIVPET 수력시험 장치의 적용가능성을 검토 중에 있다.