

동적거동 관점에서의 돌풍에 대한 고속전철 운행속도 영향 연구

박찬경*·김영국**·최강윤***

Analysis of Dynamic Behavior of the High Speed Train by External Force due to the Gust

C. K. Park, Y. G. Kim and K. Y. Choe

Key Words: Railway Dynamics(철도차량동역학), Gust(돌풍), High Speed Train(고속전철), Suspension(현수장치), Derailment(탈선)

Abstract

The dynamic behavior of high speed train is very important because it should be safe and is satisfied with the ride comfort of passengers. The railway is composed of many suspension components-1st springs, 1st dampers, 2nd springs, 2nd dampers etc- that have an influence on the dynamic characteristics of high speed train. Also, the wheel/rail shapes, the track condition and geometry and many environmental factors-rain, snow, wind etc-are affected the dynamic behavior of high speed train.

This paper is reviewed the effect of wind(gust) on the dynamic behavior of high speed train. Vampire program is used for this simulation. The result of simulation shows that high speed train should not be operated when the gust speed is beyond 34.5m/sec.

1. 서론

철도차량은 동적 질량요소로서 차체, 대차 및 휠 셸으로 크게 구성되고, 이를 연결하는 현수장치로 차체와 대차간에 1차와 대차와 휠 셸간에 2차 현수 장치로 구성되며 이들 현수장치들은 탄성 및 댐핑 요소들로 구성된다. 이러한 현수장치와 휠과 궤도의 접촉조건(휠/레일 형상, 궤도조건)은 철도차량의 동적 안전성과 승차감에 중요한 영향을 미치는 요소이다. 또한, 비, 눈 및 바

람과 같은 환경요인 등도 철도차량의 동적 안전성에 영향을 미치는 중요한 요소가 된다.

본 연구는 고속전철 운행에 영향을 미칠 수 있는 많은 환경요인 가운데 바람, 특히 돌풍이 차량을 향해 불었을 때에 돌풍이 열차의 동적 안정성에 미치는 영향에 대해 VAMPIRE 프로그램을 이용하여 해석하였다.

2. 동특성 모델링

2.1 차량모델링

철도 차량의 동적 거동 해석은 영국 철도 연구소에서 개발된 철도 차량 전용 해석 프로그램인 Vampire를 이용하여 수행한다. 해석을 위한 시스

* 한국철도기술연구원 선임연구원 ckpark@krii.re.kr
** 한국철도기술연구원 선임연구원 ygkim@krii.re.kr
*** 한국철도기술연구원 선임연구원 kchoe@krii.re.kr

템 편성 모델과 좌표계는 다음 Fig. 1과 같다.

차량시스템 해석모델은 동력차, 동력객차, 객차(3대) 및 동력객차로 구성하였으며, 대차는 동력차용 동력대차(PMB) 2대, 동력객차용 동력대차(MTB) 전후 2대 및 동력객차와 객차, 객차와 객차를 연결하는 관절대차(ATB) 4대로 구성되어 있다(Fig.2 참조).

또한, 편성모델의 동적특성치는 Table 1에 관성 특성치와 Table 2 ~4 에 각 대차에 대한 현수 특성치를 나타내었다.

Table 1, 2, 3 및 4의 특성치를 이용하여 Vampire로 열차 모델을 Fig. 3과 같이 구성하였다.

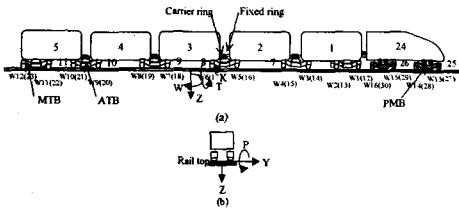
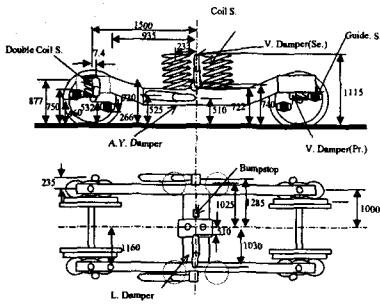
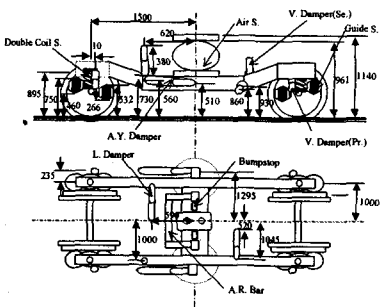


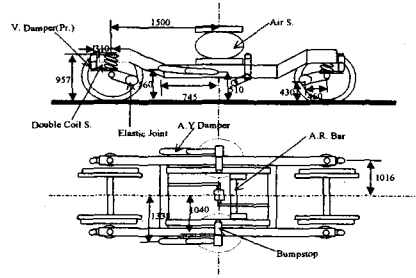
Fig. 1 Schematic Diagram of Train and Axis System



(a) Power Motor Bogie(PMB)



(b) Motorized Trailer Bogie(MTB)



(c) Articulated Trailer Bogie(ATB)

Fig. 2 Schematic Diagram of Bogies

Table 1 Characteristics of Mass Properties

Content	C.G. (H,m)	Mass (Mg)	M. of Inertia(Mg-m ²)			N
			Ixx	Iyy	Izz	
MC1	1.535	42.758	55.57	1643.62	1697.07	1
TC1	1.623	25.673	33.36	955.29	955.29	1
TC2	1.627	26.373	34.27	981.34	981.34	1
3	1.623	26.305	34.19	978.81	978.81	1
MC2	1.535	42.648	55.425	1639.39	1692.7	1
MTB	0.56	3.076	2.07	3.26	3.86	2
ATB	0.56	3.018	2.03	3.2	3.79	4
Wheelset	0.46	2.104	1.03	0.0008	1.03	16
PC	1.72	54.960	59.4	1132.8	1112.9	1
PMB	0.56	2.420	1.645	2.593	3.068	2

Table 2 Suspension Characteristics of PMB

Element of Susp.	Mechanical Characteristics						
	X	Y	Z	T	P	W	
Pr.	Double Coil S.	0.38	0.38	0.74	0.1	0.1	0.1
	Guide S.	19.13	3.78	0.19	0.04	0.03	0.47
	V. Damper			0.01			
Se.	Coil S.	0.15	0.15	0.63	0.1	0.1	0.1
	V. Damper			0.02			
	L. Damper		0.1				
	A.Y. Damper						4.23
	Pivot	10.29					
	Bump-stop	-75.0	-65.0	-60.0	-55.0	-45.0	0.0
	-45.0	-13.0	-5.0	-2.0	0.0	0.0	

Table 3 Suspension Characteristics of MTB

Element of Susp.	Mechanical Characteristics						
	X	Y	Z	T	P	W	
Pr.	Double Coil S.	0.17	0.17	0.52	0.1	0.1	0.1
	Guid S.	56.41	0.24	0.04	0.06	0.01	0.06
	V. Damper			0.005			
Se.	Air S.	0.14	0.14	0.37	0.37	0.18	0.15
	A.R. Bar				3.8		
	V. Damper		0.03				
	L. Damper			0.02			
	A.Y. Damper						4.23
	Pivot	10.29					
Bump-stop	-70.0	-65.0	-60.0	-55.0	-45.0	0.0	
	-45.0	-13.0	-5.0	-2.0	0.0	0.0	

Table 4 Suspension Characteristics of ATB

Element of Susp.		Mechanical Characteristics					
		X	Y	Z	T	P	W
Pr.	Double Coil S	0.17	0.17	0.5247	0.1	0.1	0.1
	Elastic Joint	56.41	0.24	0.04	0.06	0.01	0.06
	V. Damper			0.005			
Se.	Air S.	0.17	0.17	0.30	0.30	0.15	0.17
	A.R. Bar				3.8		
	A.Y Damper						0.24
	Pivot	0.8	0.01	0.01	1.66	0.0	3.32
	Bump-stop	-80.0	-70.0	-65.0	-50.0	0.0	
		-28.0	-9.0	-5.0	0.0	0.0	

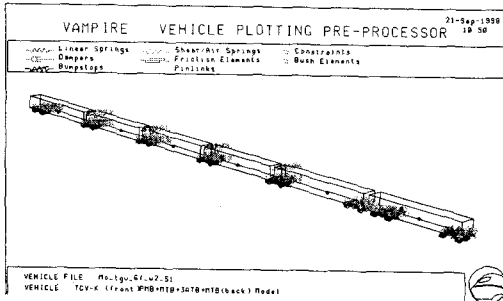


Fig. 3 Completed Vehicle Modeling(Vampire)

2.2 돌풍 모델링

차량의 운행중에 돌풍이 불면 돌풍의 속도에 의해 발생하는 동압(dynamic pressure)으로 인하여 차량이 측면에서 하중을 받게된다. 본 연구에서 사용된 Vampire의 경우에 외력은 집중하중을 사용해야하므로 돌풍에 의해 차량에 가해지는 외력은 Fig. 4와 같은 스텝하중(5초간 돌풍 작용)이 차량중심에 작용하는 것으로 가정하여 해석한다. 또한, 돌풍의 속도에 대한 하중의 크기와 관계는 Fig. 5와 같다.

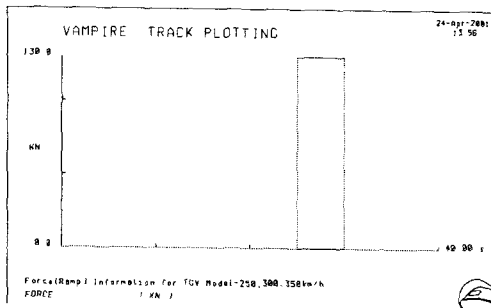


Fig. 4 External Force Model of Wind(Gust)

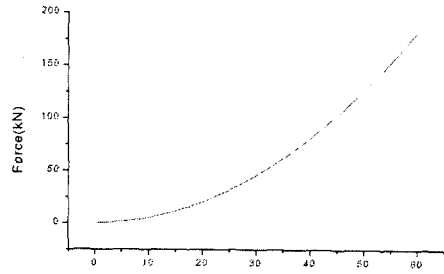
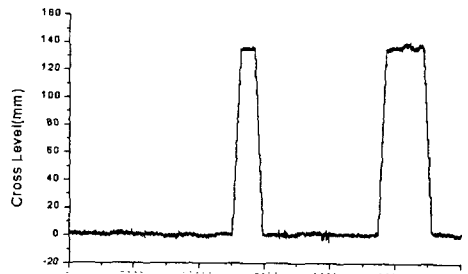


Fig. 5 Force vs. Speed of Wind

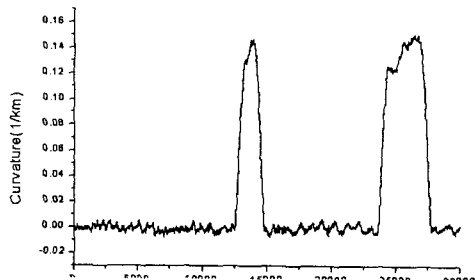
2.3 궤도 모델링

현재 시운전중인 경부고속철도 시운전 구간의 전체길이는 동서울역 기점 86km지점에서 143.2km 지점까지 총 57.2km이며, 이 구간에는 터널과 교량이 이어져 있고, 천안역과 오송역이 존재한다. 또한, 최대 종구배는 14%이며 최대 곡선반경은 7000m로 3곳에 존재한다.

Fig. 6은 동서울 기점 106.3 ~ 136.3km구간인 30km에 대한 궤도검측 결과중 일부(캔트, 곡률)만을 나타낸 것이다.



(a) Cross Level(Cant)



(b) Curvature

Fig. 6 Data of Track Irregularity

Fig. 6에서 보는 바와 같이 30km 구간에는 7000m 곡선반경이 2곳 존재하며, 진행방향에 대해 시계방향(+Y방향)으로 굽어진 형태이다. 또한, 캔트는 최대 140mm로 진행방향에 대해 좌측 궤도가 우측궤도보다 높게 설정되어 있다. 그 외에 검측결과로는 좌우 방향틀림의 경우는 전반적으로 $\pm 4\text{mm}$, 최대 6mm를 나타나고 있으며, 고저 틀림은 전반적으로 $\pm 2\text{mm}$, 최대 6mm로 나타나고 있다. 또한, 궤간 틀림은 전체적으로 3mm가 넓게 설치되어 있고, 최대 $\pm 6\text{mm}$ 의 변동을 갖고 있다.

본 연구에서 사용된 궤도조건은 Fig. 6의 30km 구간 데이터 가운데 5km(23~28km구간)를 선택하여 시뮬레이션에 사용하였다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1 시뮬레이션 조건

돌풍이 차량의 동적 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위해 아래의 2개 조건에 대한 탈선계수(Y/Q)를 구하여 평가를 수행하였다.

□ 열차 회전방향(+Y)으로 돌풍 작용시

· 열차속도(km/h):

100, 150, 200, 250, 300, 350

· 돌풍으로 인한 외력(kN):

0, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130

□ 열차회전의 반대방향(-Y)으로 돌풍 작용시

· 열차속도(km/h):

10, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350km

· 돌풍으로 인한 외력(kN)

0, 50, 60, 70, 80, 90, 110, 130

3.2 열차 회전방향(+Y)으로 돌풍 작용시

철도차량의 안전성을 확보하기 위한 탈선계수(Y/Q)는 평균 0.8이하, 최대 peak 1.2이하로 제한하고 있다. Fig. 7, 8 및 9는 모든 휠(좌/우측 16개씩)에서 계산한 결과의 예로 외력이 -Y방향으로 70, 80 및 130kN이 작용한 경우에 여러 속도에 대해 탈선계수의 peak치를 구한 것이다. 외력이 70kN이하인 경우에는 속도와 관계없이 모든 휠에서의 탈선계수 peak치가 한계치 이하이므로 열차의 안전성에 문제가 없다. 그러나, 외력이 80kN인 경우는 Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 같이 열차속도가 250km/h이상일 때 일부 휠에서 탈선

계수 peak치가 한계치를 초월하게 되어 열차의 안전성에 문제가 발생된다. 외력이 90kN이상이면, 열차속도에 관계없이 대부분의 휠에서 한계치를 벗어난 탈선계수 peak치를 갖게되므로 탈선하게 된다. Fig 10, 11 및 12는 외력이 70, 80 및 130kN이고 열차속도가 350km/h인 경우에 15번째 휠에서의 탈선계수를 나타낸 것이다.

이 경우는 Fig. 7, 8 및 9에서 보는 바와 같이 좌측 휠에 큰 값의 탈선계수가 나타나므로 차량은 진행방향에 대해 바깥(-Y 방향)으로 탈선하게 된다.

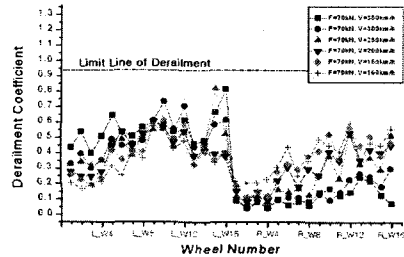


Fig. 7 Derailment Coefficient(Y/Q) of Each Wheel (F=-70kN)

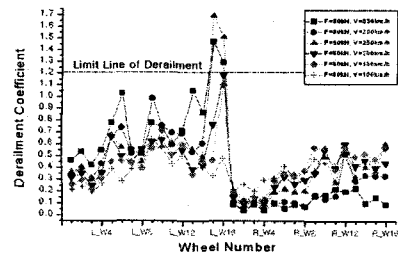


Fig. 8 Derailment Coefficient(Y/Q) of Each Wheel (F=-80kN)

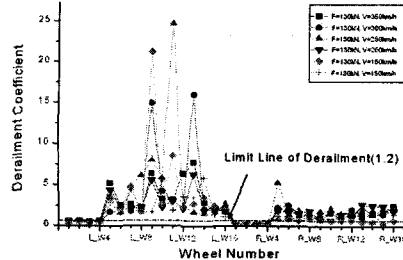


Fig. 9 Derailment Coefficient(Y/Q) of Each Wheel (F=-130kN)

또한, 외력이 130kN인 경우에는 우측 휠의 탈선계수가 한계치를 넘는 경우가 발생한다. 이는 돌풍(5sec)이 작용하고 나서 차량이 복원되면서 나타나는 2차적인 충격인데(Fig. 7 참조), 열차가 돌풍에 의해 이미 좌측으로 탈선되었기 실제적으로는 의미가 없다

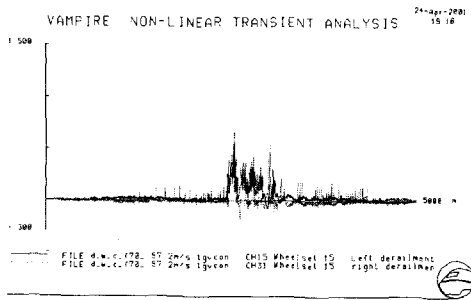


Fig. 10 Y/Q of 15th Wheel (F=-70kN)

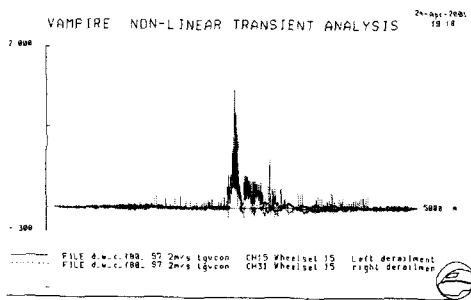


Fig. 11 Y/Q of 15th Wheel (F=-80kN)

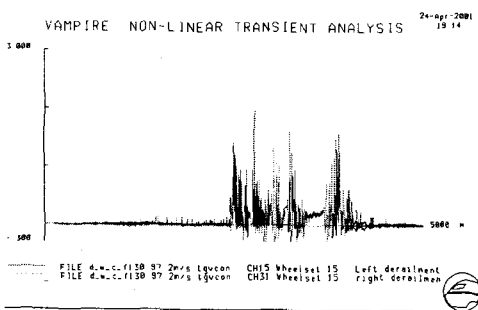


Fig. 12 Y/Q of 15th Wheel (F=-130kN)

3.3 열차회전의 반대방향(-Y)으로 돌풍 작용시
2.3절에서 궤도모델링에서 설명한 바와 같이

곡선구간에서는 차량속도에 의해 발생하는 원심력으로 인한 열차의 동적으로 불안정하게 되는데, 이를 없애기 위해 캔트가 설치된다. 시뮬레이션구간의 최대 캔트는 140mm로 열차의 균형속도가 295km/h일 때에 해당하는 것이다. 이 경우에 문제가 되는 것은 바깥쪽(-Y 방향)에서 부는 돌풍에 의해 열차가 안쪽(+Y 방향)으로 탈선할 수 있다. Fig. 13, 14 및 15는 6번째, 15번째 및 16번째 휠(좌, 우)에서 그 영향에 대한 해석결과 의 예로 외력이 열차회전방향에 대해 반대(+Y)로 60, 70 및 130kN이 작용한 경우에 여러 속도에 대해 탈선계수의 peak치를 구한 것이다. 외력이 60kN이하가 작용하는 경우에는 속도와 관계없이 모든 휠에서의 탈선계수의 peak치가 한계치이하이지만, 외력이 70kN인 경우에는 낮은 열차속도에서 한계치 이상의 피크를 갖게된다(Fig. 14 참조). 오히려 고속인 경우에 탈선계수가 한계치 이내에 있는 데, 이것은 열차에서 발생하는 원심력이 돌풍에 의한 하중을 상쇄시키는 효과때문이라고 판단된다. 또한, 외력이 80kN이상일 때에는 열량속도에 관계없이 항상 탈선계수의 한계치를 벗어나 탈선하게 된다. Fig 15, 16 및 17은 외력이 60, 70 및 130kN이고 차량속도가 350km/h인 경우에 15번째 휠에서의 탈선계수를 나타낸 것이다.

또한, 이 경우에는 3.2절과 반대로 탈선계수가 우측 휠이 좌측 휠보다 커야 정상이지만, 외력이 60kN일 때, 탈선계수가 일부 휠에서 우측이 좌측보다 작은 값을 갖는 데, 이는 앞 절에서 설명한 바와 같이 돌풍이 작용한 후의 차량복원에 의한 2차 충격으로 발생한 현상이다(Fig. 16 참조).

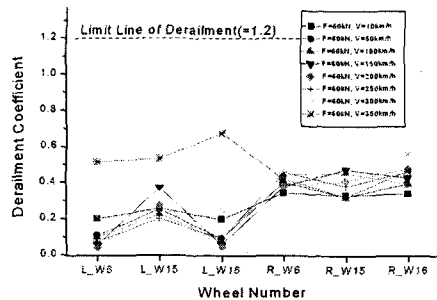


Fig. 13 Derailment Coefficient(Y/Q) of Each Wheel (F=60kN)

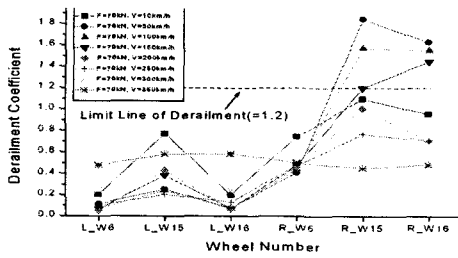


Fig. 14 Derailment Coefficient(Y/Q) of Each Wheel (F=70kN)

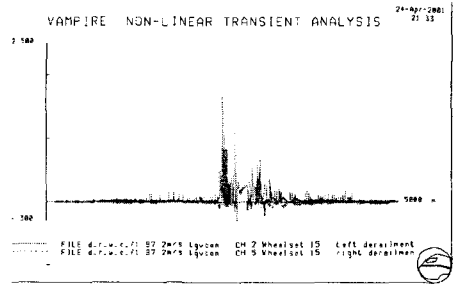


Fig. 18 Y/Q of 15th Wheel (F=130kN)

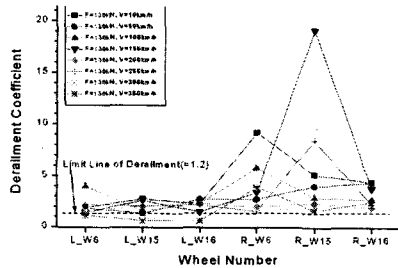


Fig. 15 Derailment Coefficient(Y/Q) of Each Wheel (F=130kN)

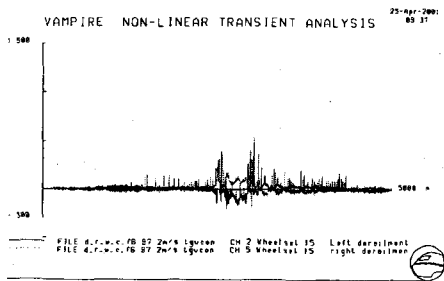


Fig. 16 Y/Q of 15th Wheel (F=60kN)

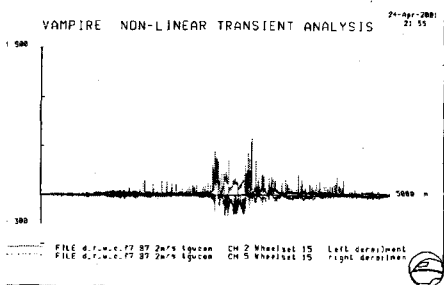


Fig. 17 Y/Q of 15th Wheel (F=70kN)

4. 결론

이상에서 연구결과로부터 돌풍이 부는 경우에 고속전철의 운행의 제한이 필요하다는 것을 알 수 있다. 돌풍이 열차 회전방향에서 부는 경우에는 돌풍에 의한 외력이 70kN(돌풍속도 37.3m/s) 이상일 때 진행방향에 대해 바깥쪽으로 열차가 탈선하게 되며, 열차 회전방향에 대해 반대방향에서 불 때는 외력이 60kN(돌풍속도 34.5m/s) 이상인 경우에는 진행방향에 대해 안쪽으로 열차가 탈선하게 된다. 또한, 돌풍의 방향이 수시로 바뀌는 경우에는 돌풍속도가 34.5m/s 이상에서 열차가 탈선하게 된다. 따라서, 고속전철을 운행할 때에는 바람의 영향을 고려하여 운행여부를 결정해야 할 필요가 있다고 판단된다.

후기

본 연구는 G7 고속전철 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) BRR, 1998, VAMPIRE Users Manual.
- (2) 한국철도기술연구원, 1998, "고속전철 시스템 기본사양".
- (3) 박찬경, 김기환, 현승호, 1998, "Vampire를 이용한 경부고속철도 차량의 동적 안정성 해석", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp 510-516.
- (4) 목재균, 1998, "동적압력부하 변화에 따른 차량운행 특성연구", 한국철도기술연구원 기술보고서.