

# 경량전철 선로선형기준에 대한 제안

## Proposal of the Track Layout Criterion for the Light Rail Transit

오지택\*, 한승용\*\*, 윤태양\*\*\*, 성택룡\*\*\*\*

Oh, Ji-Taek Han, Seung-Young Yoon, Tae-Yang Seong, Taek-Ryong

### Abstract

This paper proposes the track layout criterion for the LRT(light rail transit). All criterions established concerning dimension and performance of LRT vehicles that are three types. Types of vehicles are AGT(automated guided train) steel wheel, AGT rubber tire and LIM(linear induction motor). Using theoretical approach, adaptation and validity of criterions are verified. Proposed criterions may provide a standard scheme for design and construction of the infrastructure on LRT.

### 1. 서론

경량전철은 대도시 교통체증해소와 대중교통수단(버스, 철도, 항공기 등)간의 연계수단으로서 그 건설의 필요성이 부각되고 있다. 본 제안에서는 국내에서 개발될 경량전철 차량의 종류를 크게 고무차륜 차량과 철제차륜 차량으로 구분하여 경량전철 선로 선형에 대하여 설계기준(안)을 제시하였다. 제시된 선형기준들은 개발될 경량전철 차량의 제원을 고려하여 이론적으로 검토되었으며 향후 경량전철 시험선로에 적용한 후 실험적인 기준의 타당성을 확보하게 될 것이다. 경량전철에 대한 설계 및 건설 실적이 전무한 국내실정에 있어서 경량전철 선형(안)은 표준화된 열차 주행로 및 선로 구축물 설계 및 시공방안을 제공할 수 있다.

### 2. 경량전철 차량유형 및 목표사양

국내에서 개발하고자 하는 경량전철시스템은 3개 유형의 개발차량과 기존의 중량전철에 비하여 운행방식의 첨단화, 정시성 및 기동성이 향상된 교통수단으로서 시간·방향당 5,000~40,000인의 수송능력을 갖추게 될 것이다. AGT시스템은 승무원이 없는 무인운전시스템으로서, 차륜에 따라 고무차륜 및 철제차륜으로 나뉘며 기존의 지하철에 비하여 규모 및 수송용량이 약 20~50% 작고 보통 2~6량 편성으로 양방향 운전이 가능하다. LIM시스템은 선형유도모터로 추진되는 시스템으로 차량과 reaction plate간의 전자력을 이용하여 추진력을 발생시킨다. 기존의 전동차 추진방식과는 달리 차륜과 레일간 점착력에 의해 추진되므로 급구배의 선로조건에서도 운행이 가능한 시스템이다. 차량유형별 열차운행 편성수는 표 1과 같다. 경량전철차량에 대한 목표사양(안)은 건설교

\* 한국철도기술연구원, 선임연구원, 공학박사, 031-461-0234(교265), jtoh@krti.re.kr

\*\* 한국철도기술연구원, 연구원, 공학석사, 031-461-0234(교268), aceno2000@yahoo.co.kr

\*\*\* 포항산업과학연구원, 토목구조연구팀장, 공학박사, 031-370-9580, tyoon@rist.re.kr

\*\*\*\* 포항산업과학연구원, 선임연구원, 공학석사, 031-370-9585, trseong@rist.re.kr

통부(1998)와 한국철도기술연구원(1999)에서 제시한 것으로 표 2와 같다.

표 1. 차량유형별 열차운행 편성수

차량종류	열차운행편성
AGT 철제차륜	기본 2량 1편성, 최대 4량
AGT 고무차륜	기본 4량 1편성, 최대 6량
L I M	기본 2량 1편성, 최대 4량

표 2. 경량전철 차량 목표사양(안)

항 목	표 준 사 양			비 고
	AGT		L I M	
	철 제 차 륜	고 무 차 륜		
최 급 구 배	48 %	58 %	60 %	
최소곡선반경	본선 50m	본선 40m	본선 100m	
	측선 30m	측선 30m	측선 80m	
궤 간	1,435mm	1,700mm	1,435mm	
성능최고속도	80km/h/s 이상	80km/h/s 이상	80km/h/s 이상	
최고운행속도	70km/h/s 이상	70km/h/s 이상	70km/h/s 이상	
가 속 도	3.96km/h/s	3.96km/h/s	3.6km/h/s	
감 속 도	4.68km/h/s	4.68km/h/s	3.6km/h/s	
연결면간거리	26,400mm(2량기준)	9,640mm(1량기준)	26,400mm(2량기준)	
차 체 길 이	25,900mm(2량기준)	9,140mm(1량기준)	12,700mm(1량기준)	
대차중심간거리	10,000mm	5,300mm	8,500mm	
대차축간거리	2,100mm	-	1,900mm	
최 대 차 체 폭	2,650mm	2,400mm	2,650mm	

### 3. 선로선형

#### 3.1 속도규정

##### 3.1.1 철제차륜(AGT, LIM)의 곡선반경별 주행속도(안)

철제차륜 차량의 곡선반경별 주행속도(안)은 다음 식에 의하여 구한다.

$$V = \sqrt{\frac{127GR}{2aH}}$$

여기서  $H$ =차량 중심높이(mm),  $G$ =궤간(mm) 그리고  $a$ =안전율이다. 위 식을 이용하여 차량 중심높이는 2,000mm, 궤간은 1,500mm, 안전율은 3으로 하여 계산을 하면 다음 표 3보다 적은 속도로 곡선을 통과하여야 한다.

##### 3.1.2 고무차륜의 곡선반경별 주행속도(안)

고무차륜의 곡선 반경별 주행속도(안)은 다음 식을 이용한다.

$$V^2 \leq 127R(f+i)$$

여기서  $V$ =곡선주행속도(km/hr),  $R$ =곡선반경(m),  $f$ =차륜과 주행면 마찰계수로 0.3(습윤상태, 80km/h 주행 중 정지시)을 사용하였고  $i$ =횡단구배이다. 경량전철 고무차륜 차량의 목표사양(안)에 근거하여 최대구배 및 평지 주행시 고무차륜의 곡선반경별 통과속도는 다음 표 5보다 작아야 한다.

표 3. 곡선반경에 따른 철제차륜의 곡선통과 속도

곡선반경	통과속도	곡선반경	통과속도
50	28	150	48
60	30	200	56
70	33	250	63
80	35	300	69
90	37	350	74
100	39	400	79

표 5. 곡선반경에 따른 고무차륜의 곡선통과 속도

곡선반경	곡선통과속도		곡선반경	곡선통과속도	
	평지	구배		평지	구배
40	39	42	50	43	47
60	47	52	70	51	56
80	55	60	90	58	64
100	61	67	150	75	82

### 3.2 캔트(Cant)

#### 3.2.1 철제차륜(AGT, LIM)의 캔트

경량전철 철제 차륜에서 본선의 Cant는 다음 식에 의하여 구한다.

$$C = 11.8 \frac{V^2}{R} - C'$$

여기서  $C$ =표준캔트량(mm),  $R$ =곡선반경(m),  $G$ =궤간 중심간 거리(mm),  $V$ =열차속도(km/hr) 이며  $C'$ =허용캔트부족량(0~100mm)이다. 경량전철 철제차륜의 최대캔트는 160mm로 하며 승강장이 있는 경우에는 별도로 설정해야 한다. 캔트의 체감거리는 완화곡선이 있는 경우에는 완화곡선 전체 연장에서 감소시켜야 하며 완화곡선이 없는 경우에는 캔트의 600배 이상 거리의 직선에서 감소시켜야 한다.

#### 3.2.2 고무차륜의 횡단구배(캔트)

경량전철 고무차륜의 횡단구배는 다음 식에 의하여 결정한다.

$$i = \frac{V^2}{1.27R}, \quad C = 13.7 \frac{V^2}{R}$$

여기서  $i$ =횡단구배(%),  $C$ =표준캔트량(mm),  $R$ =곡선반경(m) 이고  $V$ =열차속도(km/hr)이다. 고무차륜 횡단구배의 체감거리는 완화곡선이 있는 경우는 전체 연장에서 감소시키고 없는 경우는 원곡선 끝에서  $L = \frac{V^3}{14R}$  이상 거리에서 캔트를 체감시켜야 한다.

#### 3.2.3 캔트 산정에 따른 곡선 통과 조건

경량전철 본선 곡선부 주행 목표 속도는 최고운행속도의 80%로 계산을 하면 56km/h, 70%로 하면 49km/h, 최대 캔트량을 160mm로 하고 허용캔트부족량을 100mm라고 하였을 때 열차별 최소곡선반경에 따른 열차 주행속도는 표 5와 같고 속도감속 없이 주행하기 위한 최소 곡선반경은 표 6과 같다.

표 5. 최소곡선반경에 따른 열차 주행속도

	최소곡선 반경	궤간	열차속도		최대 캔트
			$C' = 0\text{mm}$	$C' = 100\text{mm}$	
기존선	500(2급선)	1,500mm	82km/h	104km/h	160mm
고속선	7,000	1,500mm	327km/h	407km/h	180mm
경량(안)	50	1,500mm	26km/h	33km/h	160mm

표 6. 최고속도의 80% 및 70% 주행에 대한 최소곡률반경 ( $R_{\min}$ )

$C=160\text{mm}$	49km/h (70%)	56km/h (70%)
$C' = 0\text{mm}$	177m	232m
$C' = 100\text{mm}$	109m	143m

### 3.3 슬랙(Slack)

철제차륜(AGT, LIM)의 슬랙 필요량은 차량의 고정축거 및 곡선반경 등에 의해서 결정되는 것으로 다음 두 가지 사항에서 고려되어야 한다.

① 전축은 외궤를 따라 주행하며 후축은 저항 없이 자유 주행하는 경우(최대 슬랙)

$$S_{\max} = 1000 \frac{B^2}{4R} - \eta$$

② 차축이 여유 없이 간신히 통과할 수 있는 경우(최소 슬랙)

$$S_{\min} = 1000 \times \frac{\sqrt{(2r \cdot h)}}{R} \times B - \eta$$

여기서  $r$ =차륜반경(mm),  $h$ =플랜지의 높이(mm),  $B$ =고정축거(m),  $R$ =곡선반경(m) 및  $\eta$ =조정치(mm)이며 경량전철 철제차륜 차량의 경우  $r$ 은 380mm, 플랜지 높이는 30mm, 고정축거는 AGT 철제차륜의 경우 2.1m를 사용한다. 슬랙은 곡선 안쪽에 설치하며 완화곡선이 있는 경우는 완화곡선 전연장에 걸쳐서 감소시켜야 한다. 완화곡선이 없는 경우에는 캔트의 체감거리와 같게 하고 캔트가 없는 경우에는 각 3m로 한다. 경량전철 철제차륜의 슬랙은 다음 표 7이나 그림 1에 의하여 설치되어야 한다.

표 7. 경량전철 철제 차륜의 슬랙(안)

곡선반경 (m)	$S_{\max}$ (mm)	$S_{\min}$ (mm)	곡선반경 (m)	$S_{\max}$ (mm)	$S_{\min}$ (mm)
50	22	7	300	3	1
60	18	6	350	3	1
70	15	5	400	3	1
80	13	4	450	3	1
90	12	4	500	2	1
100	11	4	550	3	1
150	7	2	600	1	1
200	5	2	650	1	1
250	4	2	700	1	1

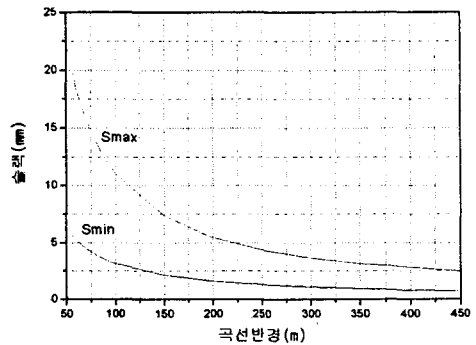


그림 1. 경량전철 철제차륜의 슬랙표

### 3.4 최소곡선반경

#### 3.4.1 경량전철 철제차륜의 최소곡선반경(안)

경량전철 철제차륜의 최소곡선반경(안)은 다음 표 8과 같다.

표 8. 경량전철 철제 및 고무 차륜의 최소 곡선 반경

	철제차륜 목표사항	고무차륜 목표사항
본 선	50	40
정 거 장	300(200)	300
측 선	30	30
분기분내	50	

최소곡선반경에 대해서는 설계 최고 속도별로 곡선반경이 정해지고 있는 것이 일반적이다. 열차가 설계 최고속도에 가까운 속도를 유지할 수 있도록 하기 위하여 일반적인 차량이 소요 캔트 부족량의 범위 내에서 설계 최고속도의 80% 정도의 속도를 유지할 수 있는 것을 기준으로 하고 있는 것이다.

### ① 철제차륜의 최소곡선 반경

캔트를 “0”으로 하여 차량의 곡선의방 전도에 대한 안전율(중력과 원심력의 합력의 작용점과 궤도중심으로부터의 거리)을 일정하게 하여 구한 다음 계산식을 이용하였다.

$$R = \frac{2aHV^2}{127G}$$

여기서  $V$ =열차속도(km/h)로 최고성능 속도의 80%를 사용하며,  $H$ =차량 중심 높이(mm),  $G$ =궤간(mm)이며  $a$ =안전율로 통상 3을 사용한다. 최소곡선반경을 곡선운행 속도뿐만 아니라 차량의 제원과 캔트의 영향 등을 복합적으로 고려하여야 한다.

### 3.4.2 경량전철(고무차륜)의 최소곡선반경

경량전철 고무차륜의 최소곡선반경에 대한 곡선 통과속도는 다음 식에 의하여 구하였다.

$$R \geq \frac{V^2}{127(f+i)}$$

여기서  $i$ =횡단구배(%),  $f$ =주행면과 바퀴의 마찰계수,  $R$ =곡선반경(m),  $V$ =열차속도(km/hr)이다.

## 3.5 종곡선 및 구배

### 3.5.1 종곡선

경량전철 종곡선의 목표(안)는 다음과 같다. 구배차 5% 초과하는 곳에는 종곡선을 설치해야 하며 곡선에 있는 구배는 곡선보정을 한 구배를 그 한도로 한다. 종곡선의 곡선반경은 1,000m이상으로 하며 그 길이는 다음 식과 같다.

$$L = \frac{R}{2} \left( \frac{m}{1,000} \pm \frac{n}{1,000} \right)$$

여기서  $L$ =횡거의 절반거리(m),  $m, n$ =인접구배(%)이고 양 구배가 다른 방향으로 변하는 경우에는 (+), 동일방향으로 변하는 경우에는 (-)로 한다. 임의  $X$ 지점에서의 종거는 다음 식을 이용하여 구한다.

$$Y = \frac{X^2}{2R} \text{ (mm)}$$

### 3.5.2 종곡선 반경의 검토

종곡선은 원곡선으로 고려하여 계산하지만 부설에 있어서는 편의상 2차 포물선을 사용한다. 종곡선 반경은 다음 사항에 대한 안전율 검토를 행하여 결정할 필요가 있다.

#### ① 차량 부상에 대한 안전율

블록부에 있어서 차량이 양쪽의 인접차량으로 밀려지면 상향의 힘을 받는다. 직선부에 있어서 반경 1,000m의 종곡선을 삽입한 경우에 차량이 상향력 때문에 부상하려고 할 때의 안전율을 고려하면 다음과 같다. 계수 2.33과 3.00은 각각 경량전철 차량의 제원을 고려하여 계산된 값이다.

$$W \leq 2.33F \sin \phi \text{ (철제차륜 차량의 경우)}$$

$$W \leq 3.00F \sin \phi \text{ (고무차륜 차량의 경우)}$$

여기서  $W$ =차량의 하중,  $F$ =연결기에 걸리는 길이방향의 최대의 힘이고  $\phi$ =두 차량이 축 방향으로 만나는 각도이다.  $F$ 의 값은 경량전철의 경우 차량중량이 최대 31t이기 때문에  $F$ 를 31t으로 하여 부상안전도에 대하여 검토하였다. 각 경우의  $W$  값을 구하면 다음 표 9와 같다. 차량부상에 대한 안전도는 표 10과 같이 매우 안전함을 나타낸다.

표 9. 경량전철 차량의 부상안전도

	차량 길이	공차 중량	$\sin \phi$ 최대치	$W(t)$	안전율
철제 차량 (2량기준)	25.6m	21t	0.0259	1.8710	≒ 11
고무 차량 (1량기준)	9.14m	12t	0.0091	0.8463	≒ 14

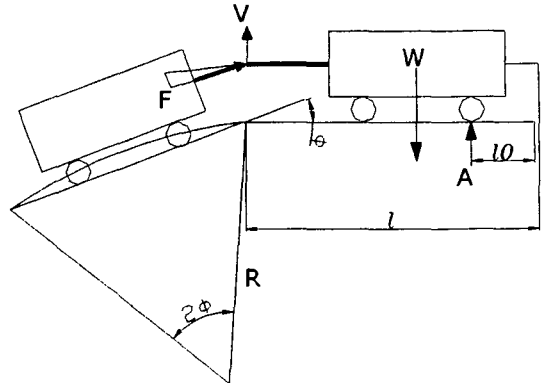


그림 2. 차량 부상에 대한 안전도

여기서  $F$  = 운동 중에 연결기에 걸리는 길이방향의 최대의 힘,  $W$  = 차량의 중량,  $V = F$ 의 상방향 부력,  $A$  = 한쪽 차량이 부상시 다른 쪽 차량에 있어서의 반력,  $l$  = 차량의 길이,  $l_0$  = 연결면에서 차륜까지의 거리,  $\phi$  = 두 차량이 축 방향으로 만나는 각도이다.

② 원심력에 의한 차량 부상에 관한 검토

원심력에 의한 차량의 부상에 대한 검토는 다음 식을 이용하여 검토한다.

$$r = \frac{V^2}{12.7}$$

여기서  $r$ =중곡선 반경(m)이고  $V$ 는 속도(km/h)이다. 경량전철의 경우  $V=70$ km/h를 적용하면  $r = 385.83m < 1,000m$ 이므로 중곡선 반경 1,000m는 충분하다고 할 수 있다.

③ 승차감 검토

반경  $R$ 의 중곡선을 속도  $V$ 로 주행하는 경우에 상하방향 원심력은 위 식과 같이  $V$ 의 제곱에 비례하여 증가한다. 이 경우 상하방향 진동에 대한 각 국의 국철 규정을 보면 0.02~0.04g이다. 평면곡선에 볼록형 중곡선이 경합한 경우의 차량주행을 고려하면 중곡선에 의한 상하방향 원심력 때문에 외관상 중력가속도가 감소하는 것으로 된다.

3.5.3 구배의 한도

구배의 완급은 철도에서는 일반적으로 고저차를 수평 거리로 나눈 값을 1,000분율(% Permillage)로 나타내며, 진행방향에 따라 상구배, 하구배로 구별한다. 경량전철 구배의 목표(안)는 다음 표 10과 같다.

표 10. 경량전철 구배의 목표사양

	철제차륜	고무차륜
본 선	48%이하	58%이하
정거장	3%이하	3%이하
측 선		3%이하

## ② 곡선저항 보정

곡선저항은 열차속도, 차량 구조, 곡선 길이 등에 의하여 다르지만, 이것에 대한 환산구배는 다음 식으로 주어진다.

$$N = \frac{700}{R} (\%)$$

여기서  $N$ =환산구배(%),  $R$ =곡선반경(m)이며  $R_c$ =차량중량 1t당 곡선저항(kg/t)이다. 위 식은 미국 철도기술협회(AREA)에서 정한 곡선저항에 대한 구배보정의 규칙을 참고로 하여 모리슨의 실험식으로 환산한 결과에 의하여 결정한 것이다.

$$R_c = \frac{353.5}{R} (\text{kg/t})$$

## 4. 완화곡선

경량전철 완화곡선(안)은 다음과 같다. 완화곡선의 길이는 다음 식에 의하여 결정한다.

$$L = 8.75 \cdot V \cdot C$$

여기서  $L$ =완화곡선 길이,  $V$ =열차 속도이며  $C$ =켄트이다. 위 식에서 켄트의 시간당 변화율은 31.75mm/s를 사용하여 유도한 것이다. 완화곡선은 곡선반경 800m이상의 곡선에는 완화곡선을 삽입하지 않을 수 있으며 부득이한 경우 시간당 변화율을 40mm/s까지 적용할 수 있다. 완화곡선의 길이는 표준켄트의 600배로 하며 부득이한 경우에는 표준 켄트의 450배까지 감축시킬 수 있다.

### 4.1. 켄트 체감 방법

켄트를 체감하는 방법에는 곡선장에 따라 일정한 비율로 체감하는 직선체감법과 직선의 주위에 5차 곡선이나 sine 곡선을 적용한 곡선체감이 있다. 3차 포물선, Lemniscate 곡선, 크로소이드 곡선 등은 직선 체감을 전제로 하여 이것에 대응하는 곡률반경을 가진 곡선이다. 직선체감법은 직선에서 곡선으로 원활한 접속은 단지 평면에서 만족할 뿐 입체면에 있어서는 무시된다. 즉 직선체감법에 의한 완화곡선의 양끝에서는 켄트 때문에 외측레일의 경사가 급변하게 되며 이 부분을 통과하는 차량에 동요나 충격을 주게된다.

### 4.2 완화곡선의 성질

완화곡선은 다음과 같은 성질을 가지고 있다.

- ① 곡선반경은 완화곡선 시점에서 무한대, 종점에서 원곡선 반경이 된다.
- ② 완화곡선의 접선은 시점에서는 직선에 종점에서 원호에 접한다.
- ③ 완화곡선에 접한 곡선반경의 감소율은 켄트의 증가율과 다른 부호가 된다.
- ④ 종점에서 켄트는 원곡선의 켄트와 같게 된다.

### 4.3 완화곡선의 종류

완화곡선의 종류는 다음과 같다.

- ① 크로소이드 곡선(Clothoid Curve) : 곡률이 곡선장에 비례하여 체감하는 곡선
- ② Lemniscate Spiral : 극좌표의 장현에 비례해서 직선체감
- ③ 3차 포물선 : 곡률을 직선 변화시키는 곡선(국내 국철에 사용)
- ④ sine 반파장 곡선 : 곡률을 곡선 변화시키는 곡선(일본 고속선에 사용)
- ⑤ 4차 포물선, 3차 나선(Cubic Spiral)등

### 4.4 3차 포물선과 sine 반파장 완화곡선의 비교

3차 포물선과 sine 반파장 완화곡선의 체감상태를 비교하면 3차 포물선의 경우 완화곡선의 시점, 원곡선 시점, 원곡선 종점, 완화곡선 종점에 각이 발생하여 고속 운전시에는 열차동요를 발생시킨다. 이정량을 동일하게 할 경우에는 sine반파장 완화곡선 쪽의 3차 포물선 완화곡선보다도 완화곡선 길이가 1.33배길게 된다. 그러나 완화곡선 중앙부 캔트의 최급구배는 sine반파장 완화곡선의 경우가 3차 포물선 완화곡선의 경우의 캔트 구배에 비교하여 약 1.2배 급하게 된다. 따라서 직선체감의 완화곡선 개소에 곡선체감을 사용하는 경우에 캔트의 최급구배를 1/400으로 할 필요가 있어 직선체감의 캔트 구배가  $\frac{1}{400 \times 1.2} = \frac{1}{480}$  이하일 필요가 있다. 이것은 완화곡선의 길이가 0.48 C이상일 필요가 있다. 다음 표 11은 3차 포물선과 sine 반파장 곡선의 선형을 비교한 것이다.

표 11. 3차 포물선과 sine 반파장의 선형비교

조건	3차 포물선	sine 반파장	비율
길이가 일정한 경우의 이정량	$\frac{1}{24} \cdot \frac{l^2}{R}$	$0.0236788 \frac{l^2}{R}$	0.56829
길이가 일정한 경우의 BCC중거	$\frac{l^2}{6R}$	$0.1486788 \frac{l^2}{R}$	0.89207
길이가 동일한 경우 캔트변화율의 최대치	$\frac{C_0}{l}$ (일정)	$\frac{\pi}{2} \cdot \frac{C_0}{l}$	1.570080
이정량이 동일한 경우 완화곡선 길이	$l$	$1.326522 l$	1.326522
이정량이 동일한 경우 캔트변화량의 최대치	$\frac{C_0}{l}$ (일정)	$1.184146 \frac{C_0}{l}$	1.184146

## 5. 결언

본 제안에서는 경량전철에 대한 필요성이 증대한 현 시점에 있어 경량전철을 건설하고자 하는 지자체 및 산업체에 토목구조물의 선형설계(안)을 향후 개발될 한국형 경량전철차량에 대응하여 제시하였다. 제시된 선형설계(안)은 차량개발기관과의 시스템엔지니어링을 통하여 표준화를 정립하는데 그 목표를 두고 있다.

### 감사의 글

본 제안은 건설교통부 “경량전철시스템 기술개발사업(선로구축물분야)”의 일부로서 수행되었으며 주관기관인 포항산업과학연구원의 연구비 및 제반지원에 감사 드립니다.