

터널환기설계 편람의 주요 개정내용

■ 이창우 / 동아대학교 에너지 자원공학과, cwlee@dau.ac.kr

2009년 12월에 개정된 도로설계편람 중 터널 환기설계편의 적용과 관련하여 변경된 개정내용을 소개하고자 한다.

개정 배경

도로터널의 환기시설은 「도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙」 제41조에 “터널에는 안전하고 원활한 교통소통을 위하여 필요하다고 인정되는 경우에는 도로의 계획교통량, 설계속도 및 터널길이 등을 고려하여 환기시설 및 조명시설을 설치하여야 한다.”라고 규정되어 있다. 따라서 터널의 환기시설 계획, 조사, 설계를 실시함에 있어서 편람의 내용을 올바르게 이해하여 이에 따른 종합적인 검토와 적절한 판단이 필요하다.

국토해양부의 도로설계편람 터널편은 1999년도에 발간된 후 차량 오염물질 배출특성, 터널내 환경기준뿐만 아니라 설계기술의 발전과 같은 국내의 환경의 대폭적인 변화가 발생하였다. 특히 2004년도 세계도로협회(WRA/PIARC)의 환기관련 권고기준, 2006 일본 고속도로주식회사 설계기준이 개정 발표되었으며, 2000년 1월 1일부터 전차종을 대상으로 제작차 배출허용기준을 선진국수준으로 강화한 환경부 대기환경보전법의 오염물질별 제작차 배출기준은 2009년 1월 1일부터 휘발유 및 경유차는 각각 미국 ULEV 및 EURO 5 수준으로 획기적으로 강화되었다. 이로 인한 소요환기량의 저감요구와 WRA(PIARC)의 권고기준에 따라 제정된 기존의 편람내용에 대한 개정이 필요하였다.

본 개정 편람에서는 (1) 설계교통량 산정 방법 개정, (2) 차량 배출량 기준의 완화, (3) 차량 배출량 보정방법의 개정, (4) 오염물질 설계농도의 강화, (5) 소요환기량 계산방식의 개정, (6) TAB(시험·조정·평가) 기준의 제시 등 다양한 개편이 이루어 졌다.

설계 교통량 산정방법

교통량은 일반적으로 해당터널의 설계교통량을 기준으로 하며 편람에서는 WRA (PIARC)에서 추천하는 교통밀도를 적용하여 구하는 것을 원칙으로 한다. 환기설계에 적용하는 차종별 교통량은 다음과 같은 순서로 계산한다.

- Step 1. 설계대상의 도로용량[pcu/h · lane]의 결정
- Step 2. 주행속도별 교통밀도의 산정
- Step 3. 승용차 환산계수 결정
- Step 4. 차종별 혼입율을 고려한 총승용차 환산계수 산출
- Step 5. 터널내 차량수 산출

도로용량

도로용량은 주어진 도로조건에서 15분 동안 무리없이 최대로 통과할 수 있는 승용차 교통량을 1시간 단위로 환산한 값으로 이상적인 조건의 도로용량에 도로 및 교통조건에 따른 감소요인을 반영한 보정계수를 곱하여 구한다. 국내의 기준값은 「도로용량 편람 2001」을 근거하여 개정하였다.

한편, 소요환기량 및 환기기 용량 산정시 교통량은 도로용량 편람에 제시된 설계속도별 도로용량을 적용하며, 제연용량 산정을 위한 경우에는 최악의 상황을 고려하여 도로용량을 적용하도록 개정하였다.

교통밀도

교통밀도는 도로의 단위 길이당 차량의 수를 의미하는 것으로 교통밀도 산정도와 교통밀도 산정식에 의해서 구할 수 있으나 본 편람에서는 계산이 용이한 교통밀도 산정식을 이용하여 구하는 것을 원칙으로 한다.



다음과 같은 교통밀도 산정식에서 정체시 교통량(D_o)는 기존의 150 pcu/km · lane에서 터널의 종류에 따른 교통특성을 고려하여 국도/고속도로 터널의 경우 150 pcu/km · lane, 도심지 터널에서는 165 pcu/km · lane로 차별화하도록 개정하였다.

$$D_t = \frac{D_o \times M_{max}}{[D_o \times V + M_{max} \times (1 - V/60)^2]}$$

D_t : 교통밀도(pcu/km · lane)

D_o : 정체시 교통량(속도 V = 0 km/h에서 국도/고속도로 터널 150 pcu/km · lane 도심지 터널 165 pcu/km · lane 적용)

M_{max} : 승용차 대수표시 최대가능교통량 또는 도로용량(pcu/h · lane)

V : 주행속도(km/h)

승용차 환산계수

대형차의 승용차 환산계수(PCE : Passenger Car Equivalents)는 교통밀도 산출을 포함한 환기량 계산시 중요한 인자로서 기존의 1992 건설부 발행 도로용량편람의 제시값에서 2004년도 국토해양부 도로용량편람 정오표에서 제시하는 값으로 개정하였으며 표 1과 같다.

추정교통량

첨두 설계시간 교통량(PDDHV)은 중방향 설계시간 교통량(DDHV)을 첨두시간계수(peak hour factor, PHF)로 나눈값으로 다음과 같이 산정한다.

$$PDDHV = \frac{DDHV}{PHF} = \frac{AADT \times K \times D}{PHF}$$

AADT : 연평균 일교통량 (대/일)

K : 설계시간 계수(일반적으로 30번째 교통량에 의한다.)

D : 중방향 교통량의 비

PHF : 첨두시간 계수

이때 환기량 계산을 위한 교통밀도는 첨두설계시간 교통량(PDDHV)을 도로의 특성에 따라 주행속도의 관계에서 다음 식으로 계산하며, 차종별 차량수(V_i)는 교통밀도 산정식과 동일한 방법으로 구한다.

$$D_t = PDDHV / (V_i \cdot NL) \text{ [대/(km} \cdot \text{lane)]}$$

편람에서는 첨두설계시간 교통량을 적용하기 위한 주행속도는 고속도로 터널의 경우는 60 km/h 이상에 적용하며, 도심지 및 일반국도 터널의 경우는 40 km/h 이상을 적용할 것을 권장하였다.

기준 배출량

환기설계 시에 적용하는 기준 배출량은 모든 차종으로부터 배출되는 매연, CO, NOx를 대상으로 하며 승용차의 경우에만 휘발유 차량임을 고려하여 매연 배출량을 고려하지 않는다. 그러나 최근 전 세계적으로 경유승용차의 보급률이 증가 추세에 있으며 2005년도 하반기부터 판매되기 시작한 국내의 경우에는 빠른 속도로 증가하고 있다. 이에 따라 WRA(PIARC)의 2004년도 보고서에서도 경유승용차의 오염물질 배출량을 제시하고 있으므로 국내에서도 환기설계시 경유승용차의 검토가 반드시 필요하다. 설계년도의 경유승용차의 보급률은 경유승용차 등록대수 및 주행거리 추이 자료를 활용하여 추정할 수 있지만 편람에서는 경유승용차의 비율을 최대 40% 이내로 계획할 것을 권장하며, 비교적 정확한 추정이 가능할 경우에는 이를

<표 1> 승용차 환산계수

구분	승용차	소형버스	대형버스	소형트럭	중형트럭	대형트럭	특수트럭
고속도로	1	1	1.5	1	1.5	1.5	2
다차선	1	1	1.5	1	1.5	1.5	2
2차선	1	1	1.5	1	1.5	1.5	1.9

<표 2> 오염물질별 배출기준 (대기환경보전법 시행규칙 별표 17 - 2009년 1월 1일 이후 제작차 배출 기준)

구분		승용차		버스		트럭			
		휘발(g/km)	경유(g/km)	소형(g/km)	대형(g/kWh)	소형(g/km)	중형(g/kWh)	대형(g/kWh)	특수(g/kWh)
매연	이전	-	-	0.06	0.25	0.08	0.25	0.25	0.25
	변경	0.000	0.005	0.005	0.030	0.005	0.030	0.030	0.030
CO	이전	2.11	-	1.27	4.90	1.52	4.90	4.90	4.90
	변경	1.060	0.500	0.630	4.000	0.630	4.000	4.000	4.000
NOx	이전	0.25	-	0.64	6.00	0.71	6.00	6.00	6.00
	변경	0.031	0.180	0.235	2.000	0.235	2.000	2.000	2.000

(참고)

- 대형차는 측정방법이 ETC모드를 기준으로 함.
- 배출량 측정방법은 휘발유, 가스차는 CVS-75, 경유를 사용하는 경차 및 소형·중형차는 유럽에서 사용하는 ECE15+EUDC 모드를 적용

<표 3> 배출량 단위변환 방법

구분	단위변환 방법
매연	<ul style="list-style-type: none"> • 승용차(휘발유, 경유), 버스(소형), 트럭(소형)의 기준배출량(m²/h) = 6.25 × 허용배출기준(g/km) × 감소계수(75%) × 속도(km/h) • 버스(대형), 트럭(중형, 대형, 특수)의 기준배출량(m²/h) = 6.25 × 허용배출기준(g/kWh) × 감소계수(75%) × 마력(PS) × 0.7355 kW • 경유차량 주행속도 33.6 km/h 적용 (참고: ECE15+EUDC 모드)
CO	<ul style="list-style-type: none"> • 승용차(휘발유, 경유), 버스(소형), 트럭(소형)의 기준배출량(m³/h) = 허용배출기준(g/km) ÷ 1,200 g/m³ × 속도(km/h) • 버스(대형), 트럭(중형, 대형, 특수)의 기준배출량(m³/h) = 허용배출기준(g/kWh) × 마력(PS) × 0.7355 kW ÷ 1,200 g/m³ • 휘발유 및 경유차량 주행속도 각각 34.2 및 33.6 km/h 적용(CVS-75 및 ECE15+EUDC 모드) • CO 밀도 1,200 g/m³ 적용 (WRA(PIARC) 2004)
NOx	<ul style="list-style-type: none"> • 승용차(휘발유, 경유), 버스(소형), 트럭(소형)의 기준배출량(m³/h) = 허용배출기준(g/km) ÷ 2,000 g/m³ × 속도(km/h) • 버스(대형), 트럭(중형, 대형, 특수)의 기준배출량(m³/h) = 허용배출기준(g/kWh) × 마력(PS) × 0.7355 kW ÷ 2,000 g/m³ • 휘발유 및 경유차량 주행속도 각각 34.2 및 33.6 km/h 적용(CVS-75 및 ECE15+EUDC 모드) • NOx 밀도 2,000 g/m³ 적용 (WRA(PIARC) 2004)

<표 4> 오염물질별 기준배출량

구분		승용차		버스		트럭			
		휘발유	경유	소형	대형	소형	중형	대형	특수
매연 (m ² /h)	이전	-	-	29.664	172.225	31.536	83.088	208.75	265.84
	변경	0.000	0.787	0.787	23.375	0.787	11.481	25.857	33.460
CO (m ³ /h)	이전	0.101	-	0.061	0.652	0.073	0.320	0.721	0.933
	변경	0.030	0.014	0.018	0.554	0.018	0.272	0.613	0.793
NOx (m ³ /h)	이전	0.010	-	0.025	0.642	0.027	0.315	0.710	0.919
	변경	0.001	0.003	0.004	0.166	0.004	0.082	0.184	0.238

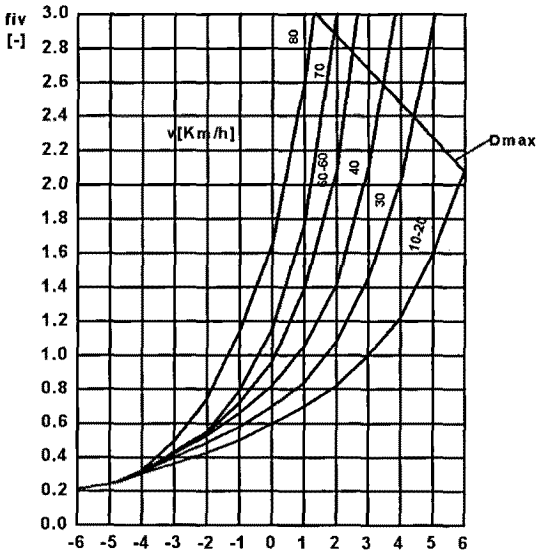


적용함을 원칙으로 하였다.

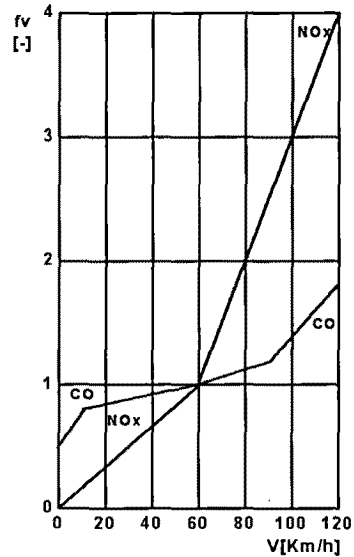
국내 제작차에 대한 배출량 기준은 2009년 1월 1일 이후부터 미국 ULEV 및 EURO 5 수준으로 강화되었으며 환기설계 목표연도를 고려할 때, 소요환기량을 산정하기 위한 기준배출량은 2009년 1월 1일 이후 적용되는 제작차 배출허용기준을 적용할 것을 권고하였다. 배출중량 기준은 표 2와 같으며 m^2/h 및 m^3/h 로 표 3의 방법에 따라 단위변환한 기준배출량은 표 4와 같이 개정하였다.

기준 배출량 보정 방법

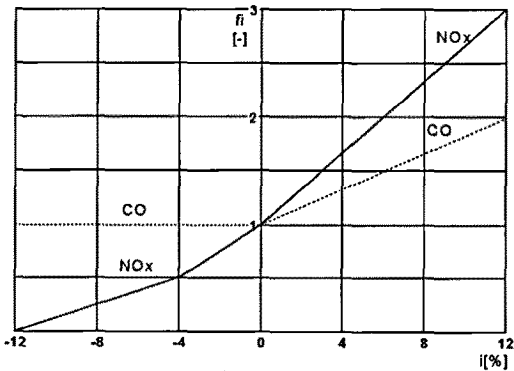
실제 조건의 도로터널에서의 차량 배출량을 산정하기 위해서는 차량의 주행조건의 변화로 인한 배출량 변화를 보정 하여야 하는데 현재까지 국내에서 운행중인 차량을 대상으로 제시된 값이 없으므로 WRA(PIARC)에서 제시하고 있는 방법을 적용한다. WRA(PIARC) 2004에서 EURO 4 차량을 대상으로 한 보정계수가 제시되어 있으나 이의 국내



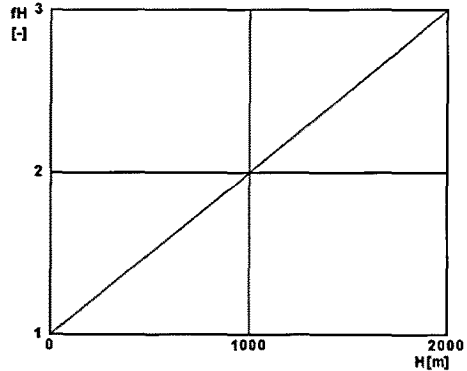
[그림 1] 매연에 대한 경사속도 보정계수



[그림 2] 속도 보정계수(CO, NOx)



[그림 3] 경사 보정계수 (CO, NOx)



[그림 4] 표고 보정계수 (매연, CO, NOx)

적용은 추후 면밀한 검토가 요구된다. 따라서, 기존 국내설계시에 적용하고 있는 WRA(PIARC) 1991 보고서에 권고 제시된 보정계수를 국내 자료가 제시되기 까지 잠정적으로 계속 적용할 것을 권고하였다.

매연, CO, NOx 의 기본 보정계수

국내의 제작차 배출량 측정을 위한 주행모드는 휘발유, 가솔차는 CVS-75(미국의 시가지 주행모드인 FTP-75와 동일)를 1987년부터, 경유를 사용하는 경차 및 소형·중형차량은 유럽에서 사용중인 ECE15 + EUDC 모드를 2004년부터 단계적으로 적용하고 있다. 따라서 2009년 1월 1일 이후 제작되는 차량에 적용되는 배출량 허용기준은 차종별로 이들 운전모드를 적용하고 있다. CVS-75운전모드는 평균차속 34.2 km/h로, ECE15 + EUDC 모드는 평균차속 33.6 km/h로 주행하며 배출량을 측정한다.

<표 5> 차속별 비차량 배출분진 배출량

v(km/h)	승용차(m ² /h)	대형차(HGV)(m ² /h)
0	0	0
5	0.4	2.3
10	0.9	4.5
20	1.8	9.1
30	2.6	13.7
40	3.6	18.2
50	4.4	22.8
60	5.4	27.3
70	6.2	31.9
80	7.2	36.5
90	8.0	41.0
100	9.0	45.6

(주) 5 km/h 는 보관법에 의한 적용값

<표 6> 차량보정계수

구분		차량보정계수					
CO	차량	1	2	4	6	8	10
	계수	1.00	1.10	1.21	1.42	1.62	1.83
NOx	차량	1	2	4	6	8	10
	계수	1.00	1.11	1.33	1.56	1.78	2.00

다. 편람에서 제시된 속도 및 경사 보정계수는 속도 30 km/h, 경사 0%, 표고 0 m를 1.0로 제시하였다.

매연 배출량 산정시 비차량 배출분진 포함

매연배출량 계산에 터널내부유분진 중 차량의 배기물질이 아닌 타이어 마모분진, 브레이크 마모분진, 도로마모분진을 추가하도록 개정하였다. 이들 비차량 배출분진의 속도별 기준배출량은 WRA(PIARC) 2004년 권고기준에 따라 표 5와 같이 권고하였다. 표 5에서 승용차는 휘발유 및 경유엔진 모두를 포함하며 3.5 ton 이하의 경상용차 까지도 포함하며, 대형차는 버스 및 트럭을 지칭하며 승용차 범위에 포함되지 않는 트럭 및 버스로 정의하였다.

차량보정계수 고려

촉매장치(catalytic converter)가 장착된 휘발유 차량의 경우, 시간경과에 따라 촉매의 열 노화(thermal ageing)로 인하여 오염물질 배출량에 직접적인 영향을 미치므로 이에 대한 검토가 필요하다. 표 6의 차량보정계수에는 EURO 3 기준 적용 차량의 노화특성이 고려되어 있는 WRA(PIARC) 2004의 차량보정계수이다.

한편 경유차량의 디젤산화촉매(oxidation catalyst)의 노화 영향은 거의 없으며 EURO4 및 5 기준에 관련된 매연포집필터(particulate matter trap)의 경우에는 노화영향에 대한 충분한 기술적 자료가 없는 실정이다. 따라서 국내 차량을 대상으로 한 충분한 자료가 확보될 때까지는 WRA(PIARC) 2004의 권고값을 적용함이 바람직하다.

설계 농도

모든 터널의 환기계획은 전속도(10 ~ 80 km/h)



에 대한 오염물질별 설계농도를 모두 만족시킬 수 있도록 수립하여야 한다. 단, 도심지 터널이나 출퇴근 등 정체빈도가 높을 것으로 판단되는 도심 근교형 터널(도시간 외곽순환 고속도로상의 터널 포함)의 경우는 주행속도 5 km/h에 대한 환기검토를 수행하여 환기설비용량을 계획할 필요가 있다. 한편, 표 7은 개정된 차속별 설계농도이며 매연, CO, NOx 모두 강화된 설계농도를 권고하고 있다.

환기량 계산 방법

2004년도의 WRA(PIARC) 권고기준에서는 1995년도 기준제시 시와는 달리 소요환기량의 계산을 위한 구체적 방법을 명확히 하지 않고 있다. 본 편람에서는 PB(Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas)사가 2006년도에 WRA(PIARC) 2004를 바탕으로 제시한 오염물질의 총배출량을 산정하는 유효승용차 환산대당 점유비방법(EPP, Effective PCU Percentage)을 총배출량 산정방법으로 제안하였다.

소요환기량 계산을 위한 논리적 순서는 기존 방법과 동일하여 (1) 차종별 교통량 산정, (2) 속도별 오염물질(매연, CO, NOx) 총배출량 산정, (3) 속도별 오염물질(매연, CO, NOx)에 의한 소요환기량 산정, (4) 최종 소요환기량 결정의 단계를 거친다. 개정 편람에서는 기존 방식에 따라 도출된 최종 소요환기량은 요구 공기치환율(최소 3회) 및 환기속도(최소 1.5 m/s)를 만족하여야 하도록 개정하였다.

① 차종별 실주행 차종구성비

차종별 실주행 차종구성비(%) = PCU차종구설비율(%) × 차령구성비율(%) × 주행거리비율(%)

② 유효승용차 환산대당 점유비율(EPP)

$$EPP = \text{차종별 실주행 차종구성비} \times \frac{1}{\text{승용차 환산계수}}$$

③ 차종별 배출량

$$Q^T = q^o \times f_{vi} \times f_h \times f_a + nemp(v)$$

Q^T : 차종별 배출량(8개차종, 차종별 15차령, 총 120 차령별 차종)

q^o : 기준배출량(매연 $m^2/h \cdot \text{대}$, CO 및 NOx $m^3/h \cdot \text{대}$)

f_{vi} : 속도 및 경사 보정계수

f_h : 표고보정계수

f_a : 차령보정계수

$nemp(v)$: 속도별 비차량 배출분진 ($m^3/h \cdot \text{대}$)

④ 차종별 환산승용차 대당 평균배출량

$$Q_{t, aver} = Q_t \times \left(\sum_{i=1}^3 EPP_{ti} \times 5 \right)$$

$Q_{t, aver}$: 차종별 환산승용차 대당 평균배출량 (매연 $m^2/h \cdot \text{대}$, CO 및 NOx $m^3/h \cdot \text{대}$)

t : 차종(8개차종, 차종별 3차령 구분, 총 24개 차종구분)

Q_t : 차종별 기준배출량(속도, 경사, 표고, 중량보정 및 비차량 배출량 포함)

i : 차령군(차령 0~14년까지를 5년씩 3개군으로 구분)

EPP_{ti} : 차종 및 차령군별 EPP

5: 차령구분단위 (5년)

⑤ 소요환기량 계산

• 매연 : $Q_T = \sum_t Q_{t, aver} \times n \times \frac{1}{3600} \times \frac{1}{K_{lim} - K_{amb}}$

<표 7> 차속별 설계농도

차속		구분		5~10 km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h
		매연(m^{-1})		0.009	0.007	0.007	0.007	0.005	0.005	0.005	0.005
개정 설계 농도	일반 범위	CO(ppm)		100 (2010년 이후 70 ppm)							
		NOx(ppm)		25 (2010년 이후 20 ppm)							

• CO : $Q_{CO} = \sum_t Q_{t, aver} \times n \times \frac{1}{3600} \times \frac{10^6}{CO_{lim} - CO_{amb}}$

• NOx : $Q_{NOx} = \sum_t Q_{t, aver} \times n \times \frac{1}{3600} \times \frac{10^6}{NOx_{lim} - NOx_{amb}}$

TAB(시험·조정·평가)

환기설비 시공후의 요구 능력 만족 여부에 대한 검사 및 조정, 그리고 개통 후의 재확인 과정의 중요성에 비추어 TAB의 목적, 수행항목, 수행내용, 수행절차를 제시하고 TAB 종합보고서에 필수적으로 포함하여야 할 사항을 명시하였다.

결론

2010 개정된 도로설계편람의 환기시설 부분은 환경부 제작차 배출기준 적용에 따른 차량 배출특성의 변화, WRA(PIARC) 권고기준 등 외국 기준의 개정 등과 같은 국내의 상황변화를 고려하여 개정하였다. 주요 개정 부분을 요약하면 다음과 같다.

- ① 설계 교통량 계산방법의 개정
 - 국토해양부 도로용량 편람의 도로용량 적용

- 교통밀도 계산시 터널 특성별 차별화
- 국토해양부 도로용량 편람의 승용차 환산계수 적용
- 침투설계시간 교통량 적용시 적용 차속 터널 특성별 차별화
- ② 차량 배출량 기준의 완화
 - 환경부 2009년 1월의 제작차량 기준 적용
 - 배출량 단위변환 방법
- ③ 차량 배출량 보정방법의 개정
 - 배출량 보정 기준속도의 개정
 - 매년배출량에 비차량 배출분진 포함
 - 차량보정계수의 고려
- ④ 설계농도의 개정
 - 설계농도의 강화
 - 설계농도 적용차속의 개정
- ⑤ 소요 환기량 계산방법의 개정
 - 유효승용차 환산 대당 점유비율 방법(EPP) 적용
 - 최소 공기치환율 및 환기속도 고려
- ⑥ TAB 포함
 - 목적, 수행항목·내용·절차 제시
 - 최종보고서 필수 포함사항 제시 ㉓