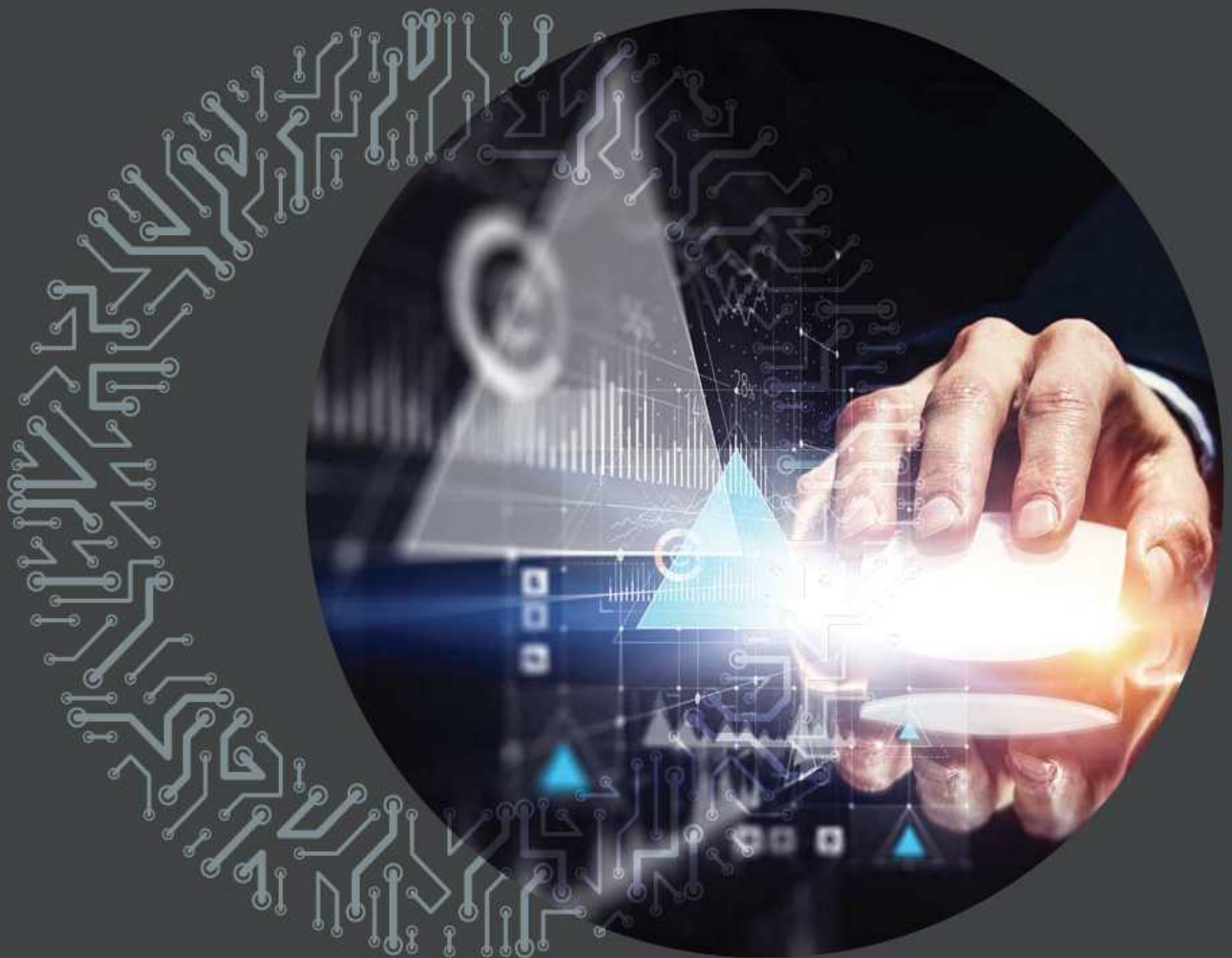



Insight Report

양자 통신/컴퓨팅
도메인 분석 :

시장 전망 및 기술개발사업
타당성 분석



※ 본 보고서의 내용은 필자의 개인적인 견해이며, 한국전자통신연구원의 공식 견해가 아님을 알려드립니다.

본 문서에서 음영처리된 부분은 () 정보공개법 제9조의 비공개대상정보와 저작권법 및 그 밖의 다른 법령에서 보호하고 있는 제3자의 권리가 포함된 저작물로 공개대상에서 제외되었습니다.



본 저작물은 공공누리 제4유형: 출처표시+상업적이용
금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

↓	요 약	1
	I. 양자정보통신의 개요	5
	1. 기술의 개념	5
	2. 기술의 특징 및 중요성	6
	3. 세부기술별 개요	7
	II. 양자정보통신 정책·기술 동향 및 시장 전망 ·	11
	1. 정책·기술 동향	11
	2. 시장 전망	19
	3. 기술분야별 활용 전망	28





III. 양자정보통신 기술개발 사업 타당성 분석 ...	31
1. 사업의 개요	31
2. 타당성 분석 방법론	37
3. 기술개발 사업에 대한 타당성 분석	45
참고문헌	52



요 약

■ 양자정보통신의 개요

- 양자물리학적 특성을 적용하여 정보통신 인프라를 보호하고, 초고속 대용량 연산이 가능하고, 초정밀 계측을 실현할 수 있는 최첨단 미래기술
 - (양자통신) 중첩성, 비가역성 등을 이용, 송·수신자간 비밀키를 안전하게 교환·분배하여, 암호화된 중요정보를 복호화하며 도감청 여부를 식별할 수 있는 기술
 - (양자소자/계측) 전자기장, 중력, 빛 등의 영향에 따른 양자 상태 변화를 이용하여 초정밀 계측을 가능케 하는 기술
 - (양자컴퓨팅) 양자고유의 중첩(superposition) 원리에 따라, 다수의 정보를 동시에 초고속으로 처리할 수 있는 새로운 개념의 컴퓨터
- 양자정보통신은 미래 컴퓨팅 패러다임을 완전히 바꿀 수 있는 대표적인 변혁적(disruptive) 기술로 해외도입이 어렵고 민간이 선제 투자하기에 위험도가 높은 분야
 - 양자암호통신, 양자시스템을 위한 소자 등 상업적 활용 가능성이 가시화되고 있는 분야부터 단계적으로 기술역량 축적 필요

■ 양자정보통신 정책 및 기술 동향

- 미국을 비롯한, 일본, 유럽 등 주요국은 국가경쟁력 확보 차원에서 장기적 관점에서 원천기술 확보 정책을 마련 중
 - 미국(국가양자정보과학비전, 2009), 유럽(Quantum Manifesto, 2016), 일본(양자 기술센터 설립) 중국(중장기 과학기술발전 계획에 양자통신기술 포함) 등
- 미국, 캐나다 등 북미 기업과 유럽 기업 중심으로 양자 통신 및 양자계산 응용 기술 개발에 적극적 투자 진행
 - ID Quantique(세계최초 양자암호통신 상용화), D-wave(세계최초 양자컴퓨터시스템 상용화), 인텔(양자프로세서), 마이크로소프트(암호응용, 양자시뮬레이션) 등
- 국내에서도 해외기관과의 공동연구를 통해 양자정보통신의 기초 기술개발을 수행 중이나, 현재 개발수준은 초기단계로 선진국과 상당한 기술격차 존재

양자정보통신 시장 전망

- (양자암호통신) 보안이 중요시 되는 국방, 국가 공공 인프라, 금융 등에 대해 양자 암호통신 적용 필요성 증대 → 보안성 강화가 시급한 분야부터 점진적 적용 전망
- (양자소자/계측) 양자소자가 우선적으로 적용될 것으로 예상되는 시장은 중력 센서, 이미지 센서, 전자기 센서, 암호통신용 단일광자 측정 센서 등으로 예상
- (양자컴퓨팅) 초기(1~2단계)에는 슈퍼컴퓨터 연산을 위한 보조프로세서로써 양자컴퓨터가 활용되다 점차 슈퍼컴퓨터의 중추적 형태로 발전될 전망. 범용 양자컴퓨터는 '20년대 중반 연구개발용으로 시작되어 '30년 경 상용화가 전망
 - 양자 컴퓨터소자는 '20년대 중반까지는 시험용, 연구개발용으로 개발되어 판매되다가 '30년경 양자컴퓨터의 상용화와 함께 상용화가 전망

표 a 양자정보통신 단기시장 전망 (단위: 백만 달러)

구분	2015	2016	2017	2018	2019	2020	CAGR
양자암호통신	950	990	1,040	1,100	1,160	1,270	6.0%
양자소자	1,700	1,840	1,970	2,030	2,090	2,200	5.3%
양자컴퓨팅 시뮬레이션	450	570	700	930	1,040	1,150	20.6%
양자컴퓨팅 프로그래밍	230	300	380	520	660	850	29.9%

출처: Market Research Media, Quantum Computing Market Forecast 2015-2020, 2014

표 b 양자정보통신 중·장기시장 전망 (단위: 백만 달러)

구분	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
양자 암호통신	14,270	22,477	32,469	47,808	67,774	91,326	114,158	129,179	136,629	139,152
양자 통신소자	429.4	676.4	977.0	1,438.6	2,039.4	2,748.2	3,435.2	3,887.2	4,111.4	4,187.3
양자 중력센서	2,209	2,405	2,619	3,422	3,726	4,734	5,155	6,415	7,858	9,507
양자 전자기센서	488	531	769	836	1,135	1,480	1,877	2,331	2,850	3,441
양자 이미지센서	6,224	8,543	11,402	14,907	21,317	26,825	33,477	41,488	51,112	62,647
1세대 양자컴퓨터	77,987	131,019	198,243	205,886	183,269	141,937	91,245	58,490	35,484	23,630

출처: ETRI 기술경제연구본부(2016.12)

📖 논리모형을 활용한 사업 타당성 분석

- 여러 분야를 아우르는 중장기 대형 연구개발 사업은 충분한 사전기획 과정을 거쳐 진행 되어야 함
 - 논리모형은 사업계획의 전반적인 작동논리를 분석함으로써, 사업 추진의 필요성 및 시급성, 사업계획의 충실성 및 성공가능성과 파급효과를 검토하여 사업추진의 타당성 여부를 결정
 - 연구개발사업의 사전평가에 유용하게 활용될 수 있으며, 현재 연구개발부문 예비타당성조사에서는 조사 대상사업의 주요쟁점 도출에 활용되고 있음
- 논리모형을 활용해 ‘양자정보통신 중장기 기술개발 사업’에 추진에 대한 타당성을 분석하여, 문제점을 파악하고 수정·보완 방향을 도출하고자 함
- **(이슈/문제의 정의)** 양자정보통신 기술 분야의 전반적인 개발 필요성을 뒷받침할 수 있는 문제점 및 이슈는 적절하게 제기되었으나, 동 사업을 구성하는 연구내용 추진의 당위성 및 대형 신규 사업의 추진 필요성을 확인할 수 있는 이슈로는 구체적이지 못함
- **(목표 설정의 적절성)** 제시된 사업목표는 선언적인 정책방향에 가까우며, 현재 시점에서 8년짜리 신규 연구개발 장기사업을 추진하는 것이 효율적이라는 것을 충분히 설명하지 못함
 - 어떤 문제를 어떤 방법으로 접근해야 효과적일지에 대한 판단이 아직 어렵다는 점을 고려할 때, 현재 단계에서 생각할 수 있는 특정 기술/방법론을 8년에 걸쳐 개발하는 것은 연구결과의 활용도(유효성)을 낮출 수 있음
- **(사업목표와 세부 활동 연계)** 동 사업은 서로 독립적인 목표로 구성된 3대 분야를 한 사업으로 병렬적으로 추진하는 비효율성이 존재함. 사업별 개별성과물들이 공통의 목표 달성을 위해 상호 연관관계를 어떻게 가지고 구체적으로 어떠한 과정을 거치는지 설명이 불충분함
- **(세부활동 성과지표의 적절성)** 일부 지표는 성과측정 대상기술의 현재 수준이 제시되지 않아 목표치 설정의 적절성을 판단하기 어려우며, 그 밖에 제시한 목표치의 수준이 명확하지 않거나 현실적이지 않은 부분이 존재
 - 현재 세계최고를 넘는 수준의 달성목표를 제시하였으나, 8년 이후의 목표치라는 점을 감안할 때 경쟁력 있는 수준의 기술력을 확보했는지 여부를 판단할 수 없음

- **(성과/영향 : 경제성 분석)** 경제성 분석에 대한 기술(T)-성과물(P)-시장(M) 연계성 검토를 통해, 성과물이 개발기술을 적절히 대표하는지, 분석시장이 R&D 성과물의 연관시장을 적절히 대리하는지를 분석함
 - **(양자통신)** 양자암호통신 시장의 경우 암호통신 장비시장 뿐 아니라 서비스 시장까지 포함하고 있을 수 있어, 성과물 범위 보다 더 큰 시장으로 판단됨
 - **(양자소자/계측)** 개발기술 간 독립적 특성이 강하여, 대표 성과물들이 간명하게 드러남. 개발기술 수준에 맞춰, 광자/비 광자 기반 양자 이미지 센서 등으로 성과물을 구분하면 좋겠으나, 시장확정 난이도를 고려할 때 현재도 적절함
 - **(양자컴퓨팅)** 비교적 성과물을 잘 대리하는 시장을 선정하였으나, 성과물의 TRL 수준을 고려할 때, 사업화 비용과 기간에 대한 추가적 할인을 적용하여 편익 추정의 정교화가 필요

I 양자정보통신의 개요

1. 기술의 개념

- 양자물리학적 특성을 적용하여 정보통신 인프라를 보호하고, 초고속 대용량 연산이 가능하고, 초정밀 계측을 실현할 수 있는 차세대 정보통신 기술
 - 불확정성, 중첩성, 비가역성, 얽힘 현상 등 양자상태의 특성을 이용하여 정보 보호의 한계, 계산능력의 한계 및 측정정밀도의 한계 극복이 가능한 최첨단 미래기술

양자의 개념

<p>양자 (Quantum)</p>		<ul style="list-style-type: none"> ■ 더 이상 작게 나눌 수 없는 에너지의 최소 단위를 가진 입자상태 				
<p>광자 (Photon)</p>	<p>양자(Quantum) : 더 이상 나눌 수 없는 에너지의 최소량의 단위 빛(光)의 양자(Quantum) : 광자 (Photon)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 입자와 파동의 성질을 갖는 빛의 양자상태가 광자 (光子, Photon)임 				
<p>양자의 특징</p>	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="379 1352 703 1594"> <p>중첩성</p> </td> <td data-bbox="715 1352 1038 1594"> <p>비가역성</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="379 1608 703 1850"> <p>불확실성</p> </td> <td data-bbox="715 1608 1038 1850"> <p>얽힘</p> </td> </tr> </table>	<p>중첩성</p>	<p>비가역성</p>	<p>불확실성</p>	<p>얽힘</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ (중첩성) 상태 값(0,1)이 동시에 공존 ■ (불확정성) 상태값을 동시에 측정할 수 없음 ■ (비가역성) 확정된 값은 다시 되돌릴 수 없음 ■ (얽힘) 두 개의 양자 쌍에 대한 특수 상관관계
<p>중첩성</p>	<p>비가역성</p>					
<p>불확실성</p>	<p>얽힘</p>					

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

2. 기술의 특징 및 중요성

- 양자물리학적 특성을 기반으로 기존의 디지털 기반의 정보통신 기술의 보안성, 계측 정밀성, 정보처리 속도 등을 획기적으로 향상시킬 수 있음

양자정보통신의 기술적 의의



출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업 사업기획보고서

- (네트워크 보안) 양자특성을 적용한 암호키를 이용하여, 해킹이 불가능한 정보통신 네트워크를 구축·운영
- (측정한계 극복) 양자 얽힘 현상을 적용하여 측정 정밀도를 100배 이상 향상이 가능하여, 반도체 미세공정의 한계 등을 극복
- (계산능력 향상) 소인수 분해 등 특정분야 연산에 있어 슈퍼컴퓨터보다 빠른 정보처리가 가능하여 보다 정밀한 기상 예측정보 등의 제공이 가능

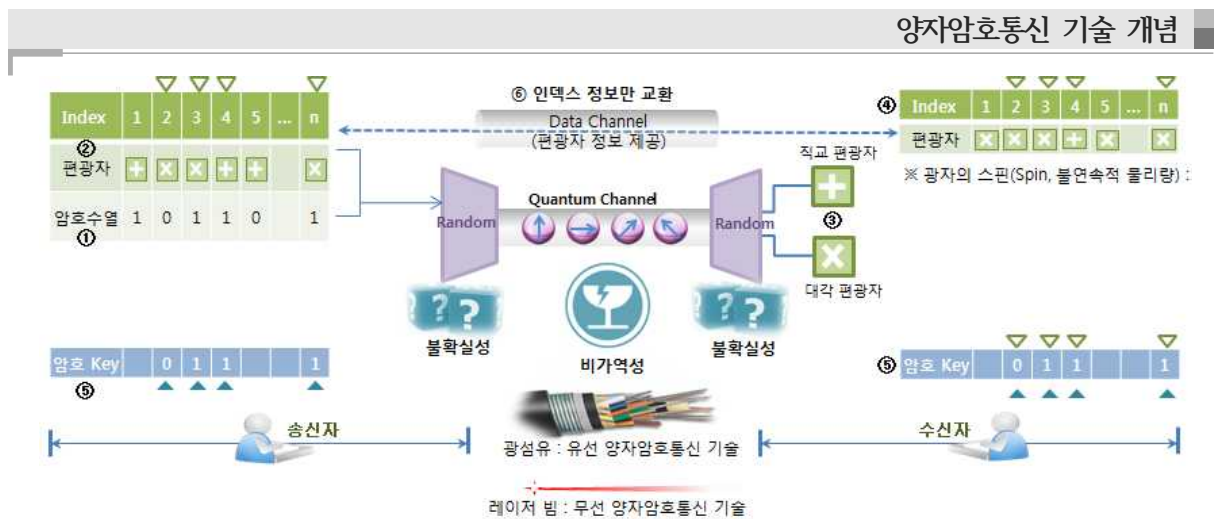
표 1 | 디지털 기술과 양자 기술의 비교

구분	디지털 기술	양자 기술
Data 표기	• 1bit는 '0' 또는 '1'로 표기	• 1 qubit(quantum bit)는 '0'과 '1' 과 같이 어느 특정한 값을 가지지 않음
Data 처리속도	• n개의 bit로 구성된 고전 컴퓨터의 경우 한 번에 n개의 정보에 대한 계산이 수행 - 10bit 연산 시 1개의 연산장치로 10번 연산 또는 10개 연산장치로 1번 병렬처리	• n개의 qubit를 갖는 양자컴퓨터의 경우 한 번의 프로세스로 2^n 개의 계산이 수행 - 10의 qbit를 사용시 2의10제곱 즉 1024 개의 연산처리 가능
보안성	• 복제 가능(소인수분해를 근간으로 공개키 암호 시스템을 사용하여 해킹에 취약)	• 복제 불가(양자암호키 시스템으로 해킹 시 상태붕괴로 도청 가능성이 없음)
메모리	• '0'과 '1'로 표현되는 bit로 구성된 메모리	• '0', '1'을 동시에 가질 수 있어 용량이 더 크고 크기도 작으며 더 빠른 메모리 구현이 가능

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

3. 세부기술별 개요

- (양자통신) 중첩성, 비가역성 등을 이용, 송·수신자간 비밀키를 안전하게 교환·분배하여, 암호화된 중요정보를 복호화하며 도감청 여부를 식별할 수 있는 기술
 - (원리) 빛의 양자인 광자에 대한 편광 특성을 활용하여 수신자가 임의의 편광자를 통해 수신한 암호키의 색인(Index)정보를 통해 암호키를 나누어 갖는 방식
 - (적용 범위) 광섬유를 통해 광자(Photon)를 송수신하는 광섬유 기반 양자암호통신 기술과 레이저빔을 통해 광자를 송수신하는 자유공간 기반 광무선 양자암호통신 기술로 구분



출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

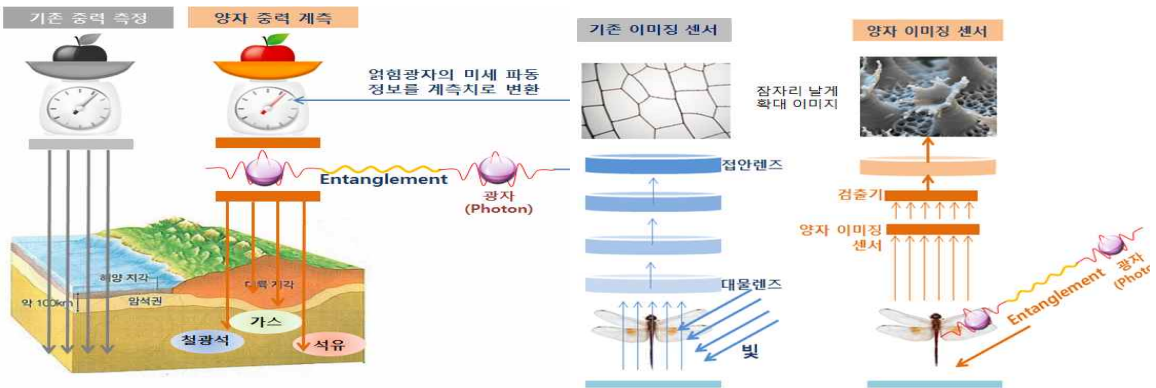
표 2 기존 통신기술과의 차별성

구분	기존 통신		양자암호통신
	광통신	무선통신	
매 체	광섬유	무선	광섬유 또는 레이저빔
중간 정보 탈취	가능	일부 가능	불가 (중간정보탈취 여부 식별 가능)
신호증폭 및 장거리 전송	가능	재전송 방식으로 가능	광자 자체에 대한 증폭이 불가능하므로 얽힘 현상을 이용한 Quantum Repeater 개발 필요
전송 속도	Gbps 급 이상	수백 Mbps급 이상	암호키 전송 시 1Mbps 수준 (암호화 데이터 전송속도는 기존과 동일)
다중노드 구성 (n 대 n)	가능	가능	기술개발 중

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

- (차별성) 현재 디지털통신 보안(암호)체계는 소인수분해에 기반하고 있어 해킹에 취약하나, 양자통신은 해킹 시도에 대한 즉각적 인지 및 차단이 가능
 - 양자의 중첩상태에서 외부 관측이 단 한번이라도 발생하면 0과 1을 동시에 가지던 원자가 0이나 1, 어느 한쪽으로 결정되기 때문에 관측(수신)자는 데이터의 변화나 소실을 통해 해킹 여부를 인지 가능
- (양자소자/계측) 전자기장, 중력, 빛 등의 영향에 따른 양자 상태 변화를 이용하여 초정밀 계측을 가능케 하는 기술
 - (원리) 양자 얽힘 상태의 超미세 파동정보를 계측치로 변환·사용함으로써 측정 정밀도를 기존 센서 대비 크게 증가(기존 센서에 비해 민감도와 해상도 우수)

초정밀 양자계측 원리



출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

- (적용 범위) 위치정보, 자원탐사의 정확도 등을 고도화할 수 있으며, 초고해상도 이미징 분석 및 초정밀 자기 공명장치(MRI) 등에도 적용 가능
 - 양자측정은 양자를 이용한 물리량 측정으로 각종 양(量)의 측정, 측정 기계의 취급과 측정오차의 해석, 단위계나 표준의 설정 등에 응용이 가능
 - 정밀도 및 보안이 요구되는 위성을 사용하지 않는 차세대 GPS 장치(방해/차단 신호 위협방지), 자원탐사용 중력센서 등에도 활용

표 3 기존 센서 기술과의 차별성

구분	중력센서		이미징 센서	
	기존 센서	양자 센서	기존 센서	양자 센서
활용분야	휴대폰, 네비게이션, 자동차 센서 등	석유·가스탐사, 차세대GPS, 비파괴 검사 등	카메라, 광학현미경, 광학측정장치 등	차세대 의료영상장치, 생체조직 영상장비 등
정밀도	수십um/s ² Hz-1/2	기존센서 정밀도의 100~1000배	최대 나노미터 크기의 물체 식별	기존센서 정밀도의 10배 이상

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

● (양자컴퓨팅) 양자고유의 중첩(superposition) 원리에 따라, 다수의 정보를 동시에 초고속으로 처리할 수 있는 새로운 개념의 컴퓨터

- (원리) 양자상태의 중첩성과 얽힘 현상을 이용하여 다수의 정보를 동시에 연산할 수 있도록 구현된 계산기로 특정 연산에 최적화된 초고속 대용량 계산 기술
 - 양자비트(qubit)를 정보처리의 기본단위로 하는 양자병렬처리를 바탕으로 정보 처리 및 연산 속도가 지수 함수적 증가
- (적용범위) 소인수 분해, 데이터베이스 검색, 최적화 등이 필요한 특수목적용 대용량 고속 연산용 양자컴퓨팅 시스템
 - 양자 컴퓨터는 양자비트(qubits)를 활용하여 정보를 저장하며, 특수 연산 및 디지털 컴퓨터보다 효과적인 정보 처리가 가능

양자컴퓨팅 계산 원리

문제: 세 개의 2진수(X, Y, Z)를 더하여 결과값(R)이 "0"되는 경우를 찾으시오?

0,0,0 0,0,1 0,1,0 0,1,1 1,0,0 1,0,1 1,1,0 1,1,1

8회 연산

경우의 수를 한번씩 논리합(OR) 연산후 결과값 확인후 다음 계산

구분	X	Y	Z	R
1회	1	1	1	1
2회	1	1	0	1
3회	1	0	1	1
4회	1	0	0	1
5회	0	1	1	1
6회	0	1	0	1
7회	0	0	1	1
8회	0	0	0	0

암호해독을 위해 129자리 정수 소인수분해를 계산할 경우 1,600대의 고성능컴퓨터로 병렬 연산하더라도 8개월 소요

입력값이 많은 복잡한 연산과정을 단순하기 위해 병렬형 연산 기법을 활용

광자 3Qbit를 얽힘 관계로 생성하는 순간 모든 경우의 수를 계산

1회 연산

구분	X	Y	Z	R
1회	1	1	1	1
1회	1	1	0	1
1회	1	0	1	1
1회	1	0	0	1
1회	0	1	1	1
1회	0	1	0	1
1회	0	0	1	1
1회	0	0	0	0

129자리 정수 소인수분해를 계산할 경우 양자컴퓨터는 수 시간내에 처리

입력값이 많은 복잡한 연산(유전자 분석, 수치해석 등)에 적합함

그러나, 특정 연산에 최적화된 알고리즘 개발, 연산소자 개발, Qbit 수 증대 및 제어 방법 등에 관한 연구가 필요한 실정임

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

- (기존 기술과의 차별성) 양자컴퓨터는 동시적 병렬연산 처리능력은 고전컴퓨터 대비 비교 불가 수준의 월등한 성능
 - 디지털 컴퓨터는 n개의 비트로 계산을 수행하여 계산속도 향상에 다양한 제약이 존재하나, 양자컴퓨터의 경우 중첩 특성을 통해 기존 컴퓨터보다 대량·고속의 정보 처리가 가능
 - 기존 컴퓨터는 숫자 계산 시 각각 한 번에 한 개씩 계산을 수행해야 하나, 양자 컴퓨터는 한 번의 프로세스로 모든 숫자에 대한 계산을 수행* 가능
 - * 양자 병렬성(quantum parallelism): 단 한번에 모든 숫자의 연산을 수행할 수 있는 성질
 - 현재 신용카드, 금융거래에 널리 쓰이는 RSA암호체계는 세계최고의 슈퍼컴퓨터로 암호해독에 수백만 년이 걸리나, 양자컴퓨터는 수 분 내 가능
 - 1000비트 숫자를 소인수 분해하는 데에 고전컴퓨터로 백만 년이 걸릴 계산을 양자 컴퓨터의 성능에 따라 1초 ~ 하루 정도의 시간에 계산

표 4 슈퍼 컴퓨터와 양자 컴퓨터 비교

슈퍼 컴퓨터	양자 컴퓨터
<ul style="list-style-type: none"> ▪ (계산능력의 한계) 슈퍼컴퓨터는 현대암호 체계 분석 불가 <ul style="list-style-type: none"> - 순서대로 반복적 계산 : 3bit 기존 컴퓨터의 경우 8회 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (동시 계산 처리) 초고속 대용량 연산을 통한 신속한 계산가능 <ul style="list-style-type: none"> - 양자 특성을 이용해 동시에 계산 : 3qubit 양자 컴퓨터의 경우 1회 
<ul style="list-style-type: none"> - 암호 해독(612자리 정수) : 백만 년 	<ul style="list-style-type: none"> - 암호 해독(612자리 정수) : 수 분 이내 
<ul style="list-style-type: none"> - 세계 1위 슈퍼컴퓨터의 전력 소모량 : 세종시의 0.5배(15MW) 	<ul style="list-style-type: none"> - D-Wave 양자 컴퓨터의 전력 소모량 : 0.025MW * 슈퍼컴퓨터의 1 / 600배 

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

II 양자정보통신 정책·기술 동향 및 시장 전망

1. 정책·기술 동향

가. 해외 정책·기술 동향

📖 정책 동향

- (미국) 국가양자정보과학비전 발표('09년)후, 국가안보국(NSA), 방위고등연구계획국(DARPA) 등에서 산학연 연계방식을 통해 연간 약 1조 원을 지원
 - 정보기관/국방부와 자국 내 IT 업체들과 연계하여 선도적인 양자기술 연구 수행
 - 국가안보국(NSA)은 보안 암호를 무력화할 수 있는 양자 컴퓨터 개발에 약 1,000억 원을 투자
 - 정부 기밀문서의 암호체계를 강화하기 위한 양자대응 알고리즘(quantum resistant algorithm)에 기반 한 새로운 암호체계 개발 계획을 발표('15.8월)
 - 기술개발로드맵은 '12년 이후 비공개 상태, 현재는 IARPA 주도로 진행 중
 - * '12년 소형 위성에 적용가능한 양자통신 기술 발표이후, 보안상의 이유로 비공개 전환
- (유럽) 유럽은 Quore라는 공동협력 프로젝트를 통해 개발 지원 및 양자 기술의 선도적인 위치를 선점하고자 'Quantum Manifesto'를 발표('16.3월)
 - 정보보안 안정성을 획기적으로 개선하고, 에너지문제 해법과 의학, 생물학 등에서의 새로운 물질 연구를 위해 1조 3천억 원 규모의 연구프로젝트를 '18년부터 추진
- (영국) '14년 양자기술 산업화 투자계획('15년부터 5년간 4,800억 원) 발표 및 '15년 양자기술 로드맵을 수립하고 상업화를 위한 지원 방안 발표
 - (기반 조성) 신뢰성 제고 및 저변확대를 위한 공동사업 추진, 로드맵의 설계, 시장 분석, 표준화 활동 등을 지원
 - (수요 창출) 양자기기의 공급사슬이 빠르게 구축될 수 있도록 정부조달(예:국방) 지원
- (일본) 일본정부는 다양한 프로그램을 통해 2000년대 초반부터 양자기술 개발 투자를 지속적으로 진행 중
 - 최첨단 연구 개발 지원 프로그램(FIRST), 과학 연구비 조성 사업, 새로운 학술 영역

연구(MEXT), 혁신적인 연구 개발 추진 프로그램(ImPACT) 등이 있음

- '05년 NIAIST 양자기술센터를 설립, 지난 10년 동안 양자정보통신기술에 약 2,100억 원을 투자하였으며 향후 5년간 5천억 원을 추가 투자 예정

- NICT 주도로 '20년까지 유선 양자통신 기술을 상용화 목표

● (캐나다) '02년부터 워털루대학 및 켈거리 대학에 양자컴퓨팅 연구소 설립 및 양자 밸리 구축을 위해 현재까지 8,000억 원 이상을 투자

- 캐나다 정부는 양자정보통신 분야의 전문 인력을 양성하기 위해서 워털루대학, 켈거리대학, 토론토대학 등에 양자정보통신학과를 설치하여 교육

● (중국) 정부가 수립한 중장기 과학기술개발 계획('05년~'20년)에 포함된 주요 16대 거대 프로젝트에 양자정보 연구를 선정하여 지원하고 있음

- NSFC는 양자정보원천 및 응용기술 개발(90여개의 프로젝트)에 약 2조 8천억 원을 지원, '16년 8월 세계최초로 무선 양자암호통신용 위성(QUESS) 발사 성공

* NSFC : National Natural Science Foundation of China, 중국 국가 과학자금 관리기구

- 세계 최대 길이인 2,000km 양자암호통신 백본(backbone) 완공('16.12월), '20년까지 유럽과 아시아, '30년까지 전 세계를 아우르는 양자암호통신 시스템 구축계획

● (호주) 정부 주도로 대학연구기관에 양자광학 이론 및 실험에 관한 양자정보 기술 개발에 많은 집중을 해왔으며, '11~'16년 기간 동안 약 2,700억 원 지원

- 호주 대학연구소는 정부 지원을 통해 양자광학 이론 및 실험에 집중적으로 연구를 수행하면서 광자 기반의 양자정보 연구에 강점 보유

■ 기술 동향

● (양자통신) 미국, 캐나다, 유럽, 중국, 일본 등의 선진국은 광케이블을 이용한 유선 양자암호통신 시스템 구현 기술을 이미 확보한 상태로 후속 연구 추진 중

- (미국) '04년 국방부 비밀정보 보호자원에서 세계 최초로 양자암호 시험 통신망 구축 하였으며 '13년부터 NASA에서 560km 거리의 양자암호통신 네트워크를 구축 중

- (스위스) ID Quantique는 '02년부터 세계최초로 양자암호통신 상용화 하였으며, '13년 307km 양자암호통신을 성공하여 현재 1Kbps급 상용제품을 판매 중

- (일본) '15년 동경대, 후지쯔, NEC가 단일광자원 방식으로 세계 최장인 120km 전송에 성공, '16년 NICT는 무선 드론에 양자암호화를 적용하여 탈취방지 실증 실험에 성공

- (중국) '16년에 세계 최대 길이인 2,000km의 베이징-상하이 간 QKD 백본망을 완공했으며, '20년까지 유럽과 아시아, '30년까지 전 세계 QKD 시스템 구축을 목표로 함
- (호주) '13년부터 NASA와 협업을 통해, 미국 내 560km 거리에 양자암호통신 네트워크를 구축 중
- (북한) 최근 양자암호통신기술개발 성공('16.2월, 노동신문)을 발표

표 5 주요국의 양자암호통신 분야 기술개발 동향

구분	기술개발 내용
미국	<ul style="list-style-type: none"> ▪ '04년, DARPA Project를 통해 세계 최초 양자암호 시험통신망 구축 ▪ * DARPA(Defence Advanced Research Projects Agency) <ul style="list-style-type: none"> - 위성기반 양자암호 통신을 연구 중이나 독자적 위성 발사계획 비공개(Los Alamos National Laboratory)
유럽	<ul style="list-style-type: none"> ▪ '08년, 비엔나-장크트렐텐 구간間 6지점, 200Km 길이의 양자암호 시험통신 성공(Austria 비엔나大) ▪ '11년, SwissQuantum 사업을 통해 CERN-제네바大 간 양자암호 시험통신망 구축·안전성 검증 완료(스위스) ▪ '02년부터 저궤도 위성을 활용한 양자암호 구축 프로젝트(Space-QUEST) 진행 중
일본	<ul style="list-style-type: none"> ▪ '12년, 45Km 광케이블 구간에서 초당 294kb의 속도로 양자키 분배 성공, 동영상 암호와 전송 성공
중국	<ul style="list-style-type: none"> ▪ '07년, 안후이성과 베이징에 양자암호 시험통신망 구축 ▪ '16년, 베이징-상하이간 2,000km의 양자암호 백본망 구축 예정 ▪ '16년 세계 최초 양자과학위성(Chinese Quantum Science Satellite) 발사 추진 예정(University of Science and Technology of China)

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

- (양자응용계측) 선진국에서는 이미 양자초정밀 센서(중력센서, 이미지센서 등) 기술 구현 가능성을 확인한 상태이며 현재 상용화 기술을 개발 중
- (미국) 과학기술정책국은 '14~'23년까지 총 10년간 뇌융합연구를 위해 양자정보통신 기술을 이용한 생체 이미지 센서 개발을 추진 중
- (영국) '16년 3월 국방과학연구소는 중력의 미세한 변화까지 탐지 가능한 양자 중력센서 기술개발 추진 중

표 6 주요국의 양자소자/계측 분야 기술개발 동향

구분	기술개발 내용
미국	<ul style="list-style-type: none"> ▪ NIST는 '97년부터 양자소자·부품 과제를 수행하여 저잡음 자기센서, 조셉슨소자 등을 개발 중 ▪ IARPA 프로그램 중 MQCO(Multi-Qubit Coherent Operations)으로 양자연산소자 개발 중
유럽	<ul style="list-style-type: none"> ▪ FP7에서 고체양자광학소자, 고체양자소자, 원자이용 양자소자를 비롯한 다양한 과제를 '19년까지 수행 ▪ 캠브리지 도시바연구소에서는 양자점, 스핀, 양자광학 등 다양한 양자소자를 연구개발 중
일본	<ul style="list-style-type: none"> ▪ '14년부터 top-down 기획으로 동경대, RIKEN, NICT 등 연구기관과 산업체가 공동으로 양자암호, 양자컴퓨터, 양자과학의 3부분에 걸쳐 실용화 연구 시작

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

- (양자컴퓨팅) 범용 양자 컴퓨터의 前단계인 Adiabatic 양자어닐링 머신 상용화 이후 관련 기술개발 및 데이터 검색 등에 활용 중
- (캐나다) '11년 D-Wave Systems은 128큐비트 양자어닐링 머신을 최초로 상용화 하였으며 '15년 1,097큐비트로 확장하여 구글, NASA, 록히드마틴 등에 판매
- (미국) 민간연구소(IBM, HP, BELL)와 대학(MIT, Stanford, Caltech), 정부기관(IARPA, NASA, NAS) 등 많은 기관에서 후속 연계 기술을 개발 중
 - * IBM은 양자컴퓨터 칩을 개발하여 인터넷을 통해 양자연산 제공하는 클라우드 서비스 시작
 - * Microsoft는 대학 및 연구소 10여 곳과 위상양자컴퓨터 연구그룹을 결성하여 양자컴퓨터 개발 중이며 Quantum Machine Learning(양자기계학습) 분야에도 연구 중

표 7 주요국의 양자컴퓨팅 분야 기술개발 동향

구분	기술개발 내용
미국	<ul style="list-style-type: none"> ▪ '14년, 구글은 UC 산타바버라와 양자 컴퓨터 하드웨어 개발 작업 시작 ▪ '14년, 마이크로소프트와 IBM은 양자컴퓨터 개발에 착수 ▪ 미국 주요 정보 기관 및 국방 기관(IARPA, DARPA, NSA, ARO)은 기업체, 국책 및 대학 연구기관과 양자컴퓨터 개발 프로젝트를 수행 ▪ 특히 미국 국가안보국(NSA)는 보안용 암호를 무력화할 수 있는 양자 컴퓨터 개발에 7,970만 달러를 투자 함
캐나다	<ul style="list-style-type: none"> ▪ '11월 세계 최초로 128 큐비트(qubit)로 이루어진 상용 양자 컴퓨터 'D-wave one'개발 및 상용화. 현재는 신형 'D-wave 2X'는 1,097큐비트(qubit) 모델임 ▪ '02년부터 워털루대학 및 캘커키 대학에 양자컴퓨팅 연구소 설립 및 현재까지 8,000억원 넘게 투자해오고 있음
유럽	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 유럽은 FP 및 Horizon 2020을 통한 범 유럽 차원의 양자정보 기술에 대해 공동 연구를 수행 ▪ 현재까지 양자 컴퓨터 관련하여 약 20여개의 프로젝트가 완료되었거나 진행되고 있음(예, SCALA, QUELE, REQC HARDWARE, SQUBIT 등) ▪ 연구 주제는 광자, 원자, 고체 기반의 양자컴퓨터 개발
호주	<ul style="list-style-type: none"> ▪ '16. 3월, 뉴사우스웨일즈대(UNSW)에서 사상 최초로 실리콘칩을 이용한 2비트 양자컴퓨팅을 실현 ▪ '16. 4월, 호주 시드니대학의 양자 나노과학연구실은 마이크로소프트와 양자 컴퓨터에 대한 공동 연구 협력 체계 구축
일본	<ul style="list-style-type: none"> ▪ '09년, FIRST 프로그램인 '양자정보처리 프로젝트'를 통해 양자컴퓨터(레이저 네트워크 방식)를 개발 ▪ '14년, FIRST 프로그램 후속 과제로 ImPACT 프로그램의 '양자 인공 두뇌를 양자 네트워크로 연결 고급 지식 사회 기반의 실현' 프로젝트를 통해 양자 컴퓨터를 통한 양자인공 두뇌 개발 진행 중
중국	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CNRS, PCQC, IOGS, SEQUIRENET 등과 같이 해외 기업 및 연구소와 협력하여 양자통신 및 양자컴퓨팅 연구에 대해 지원 중

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

● (세계 양자정보통신 투자현황) 세계 주요국의 양자정보통신 분야 연간 연구비 지원 예산은 약 2조 원 수준이며, 전문연구인력(논문게재 기준)은 약 6,800여명임

- 우리나라 양자정보통신 분야의 연구예산과 연구인력은 172억 원, 78명으로 조사 대상인 세계 20개 주요 국가들 중에서 17위를 기록

표 8 양자정보통신 관련 연간 연구예산 및 연구인력 국가 순위

순위	국가	연구예산 (억 원)	순위	국가	논문게재 연구인력 (명)
1	USA	4,766	1	China	1,913
2	China	2,913	2	USA	1,217
3	Germany	1,589	3	Germany	554
4	United Kingdom	1,390	4	United Kingdom	453
5	Canada	1,324	5	Canada	347
6	Australia	993	6	Japan	329
7	Switzerland	887	7	Australia	249
8	Japan	834	8	France	224
9	France	688	9	Italy	216
10	Singapore	583	10	Switzerland	197
11	Italy	477	11	Spain	155
12	Austria	463	12	Singapore	136
13	Netherlands	357	13	Austria	108
14	Spain	331	14	Brazil	104
15	Denmark	291	15	Poland	101
16	Sweden	199	16	Netherlands	94
17	South Korea	172	17	South Korea	78
18	Poland	159	18	Denmark	73
19	Finland	159	19	Sweden	62
20	Brazil	146	20	Finland	51

출처: Ministry of Economic Affairs(2016), Quantum Europe 2016, A new era of technology

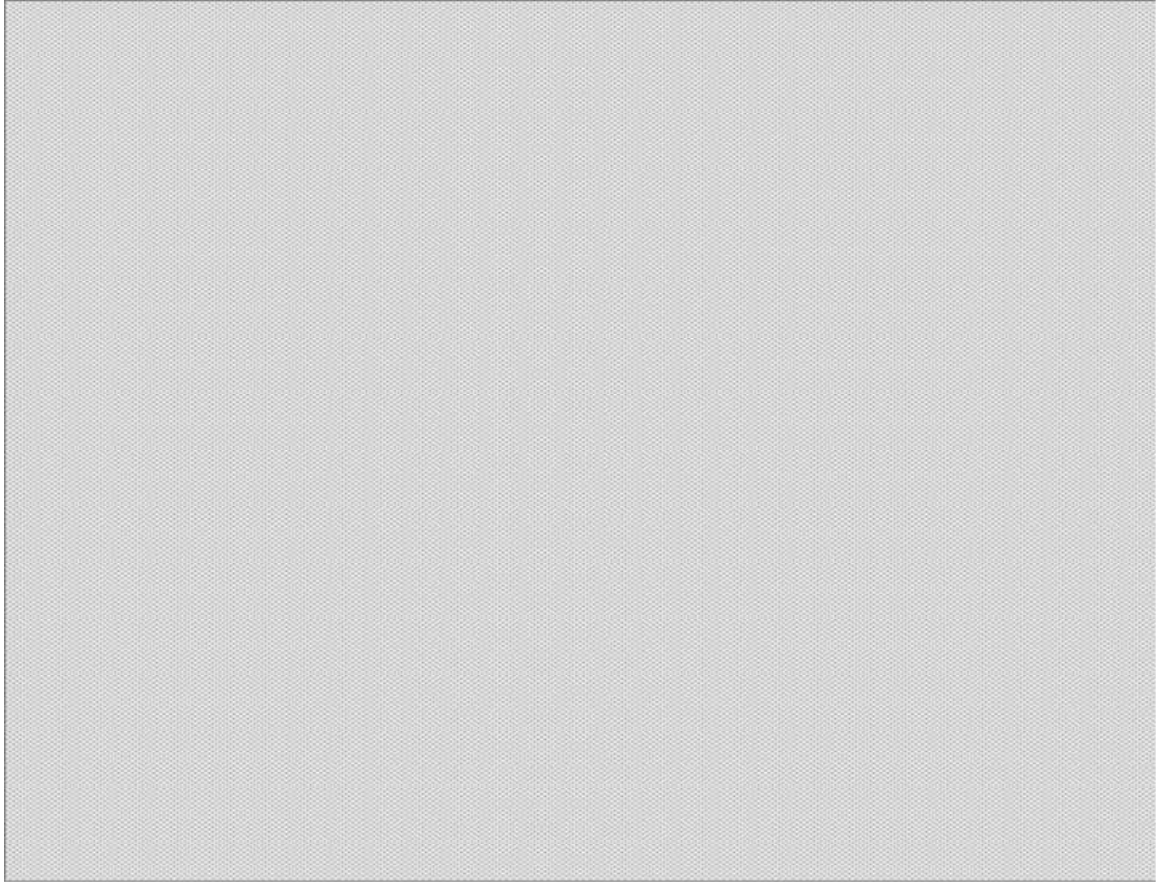
나. 국내 정책·기술 동향

📖 정책 동향

- ('13년 이전) 양자암호기술은 '12. 4월 「IT 10대 핵심 기술」, '13년 7월 「정보보호 산업 발전종합대책」에 포함되어 추진
 - '13. 3월 : 「국가초고성능컴퓨팅 활용 및 육성에 관한 법률」 제정으로 양자컴퓨팅 기술개발의 근거 마련
 - '13. 7월 : 「정보보호산업 발전 종합대책」에 양자암호기술 포함 (미래창조과학부)
- ('14년 이후) 국제적 도·감청 사건을 계기로 미래창조과학부에서 '양자정보통신 중장기 추진전략'을 수립하여 정보통신전략위원회에 상정·보고
 - '14.1월 : 양자정보통신 기술개발 및 정책지원을 위한 관계부처 과장급 회의
 - '14.2년 : 한국과학기술평가원의 「미래 10대 유망기술」에 양자정보통신 기술을 선정
 - '14.2~10월 : 「양자정보통신 중장기 추진전략」 수립, TF구성 (산학연 전문가 30여명)
 - '14.12월 : 「양자정보통신 중장기 추진전략」 수립
 - '15.12월 : 「고성능컴퓨팅 발전 포럼」(20명)을 통한 양자컴퓨팅 기술개발 방안 마련
 - '16.5월 : 「K-ICT 전략 2016」에 양자정보통신 등 ICT 유망분야 투자확대를 명기

📖 기술 동향

- (양자통신 기술) 양자통신 분야는 기술개발이 진전되어 시험·인증을 지원하기 위한 테스트베드 구축 단계 진입하였음
 - '13.3월 : Plug and Play 방식의 양자암호통신 시스템을 국내 최초 시연 (KIST)
 - '15.4월 : 단일광자 검출소자 국산화 성공 (SK텔레콤, ㈜우리로)
 - '16.2월 : 분당-용인집중국을 연결하는 왕복 68km 시험 망 구축 (SK텔레콤 컨소시엄)
- (소자·부품 및 양자응용계측 기술) 국내 대학의 양자광학측정센터 및 일부 기업을 중심으로 양자응용 계측을 위한 기초연구와 소자부품 개발을 수행 중
 - 한국표준과학연구원 광도센터와 부산대에서 '13년부터 Measurement Research Center(MRC) 프로그램을 통하여 광자계수 검출기의 양자효율을 절대 측정하는 기술을 개발하여 국제비교를 통한 표준화 절차를 진행하고 있음



출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

- SK텔레콤은 벤처기업인 ‘우리로’와 단일광자검출 핵심소자 및 양자난수발생기를 개발
- **(양자컴퓨팅 기술)** 해외 연구기관과의 공동연구를 통해 양자컴퓨팅의 기초 원리를 중심으로 기술개발 수행 중
 - ‘14년 한국전자통신연구원(ETRI)은 영국 옥스퍼드대와 차세대 ICT 플랫폼·양자컴퓨터 개발 협력협정 체결을 하고 본격 협력을 진행
 - ‘14.4월 한국과학기술정보연구원(KISTI)은 호주 뉴사우스웨일즈대학교, 미국 퍼듀대학교와 공동으로 실리콘 물질을 이용해 다중 큐비트 시스템을 구현할 수 있음을 처음 입증
 - ‘16.6월 기초과학지원연구원은 국제과학팀과 공동연구를 통해 양자컴퓨터에 사용되는 위상 절연체의 전자특성을 제어하는 기술 개발

2. 시장 전망

가. 양자통신 시장 전망

(1) 양자 암호통신시스템



표 9 Market Research Media의 세계 양자 암호통신시스템 시장 전망

구분	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2015~2020	CAGR
시장 규모 (백만 달러)								
성장률								

출처: Market Research Media(2014)

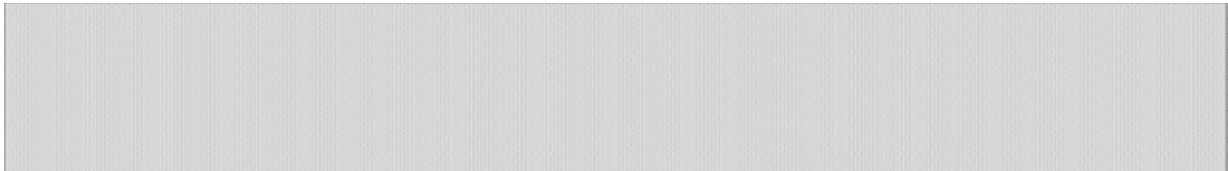
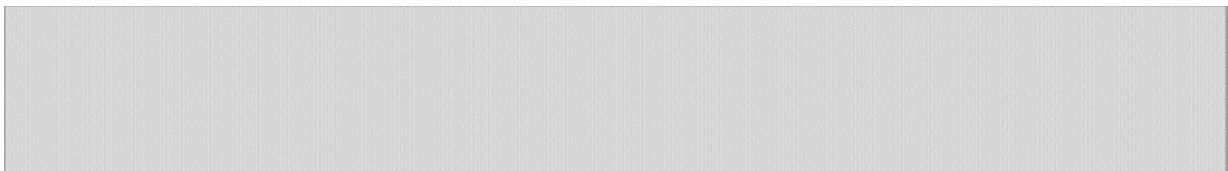


표 10 IQC의 세계 양자 암호통신시스템 시장 전망

구분	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
시장 규모 (백만 달러)									
성장률									
구분	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	CAGR
시장 규모 (백만 달러)									
성장률									

출처: IQC(2014), 주: IQC(2014)에서 발표한 그래프를 porting한 수치임



<분석 가정>

- ① 2015~2020년의 시장 규모는 앞의 Market Research Media사의 전망치를 사용
- ② 2021~2022년의 시장 규모는 Market Research Media사의 전망치 2016~2020년의 5년간의 연평균 성장률 6.0%를 2020년의 시장 규모에 적용하여 산정
- ③ 2023~2036년의 시장 규모는 본격적으로 성장할 것으로 예상하여 앞의 IQC 자료 중 2018~2031년의 14년 동안의 높은 성장률을 앞의 2022년 시장 규모에 적용하여 산정

표 11 | 세계 양자 암호통신시스템 시장 전망

구분	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
시장 규모 (백만 달러)											
성장률											
구분	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
시장 규모 (백만 달러)											
성장률											

출처: ETRI 기술경제연구본부(2016.12)

(2) 양자 통신소자

- 현재 양자 통신소자 시장에 대한 전문기관의 전망치가 부재함으로, 양자 컴퓨팅용 광자 집적회로 시장을 대리시장으로 전제하여 추정
 - (양자 컴퓨팅용 광자 집적회로) 전자 집적회로에 비해 월등한 정보 전달 속도, 초소형화, 고집적화를 가능케 하는 양자소자, 인텔, HP 등이 '17년에 광자 프로세서를 출시할 계획

표 12 | Market Research Media의 세계 양자암호통신시스템 시장 전망

구분	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
시장 규모 (백만 달러)								
성장률								

출처: MarketsandMarkets(2012)

- (자체 전망) '22년 이후의 양자 통신소자 시장규모는 앞선 MarketsandMarkets의 양자컴퓨팅 광자집적회로 시장에 IQC의 양자 암호통신 시장 성장률을 적용하여 추정

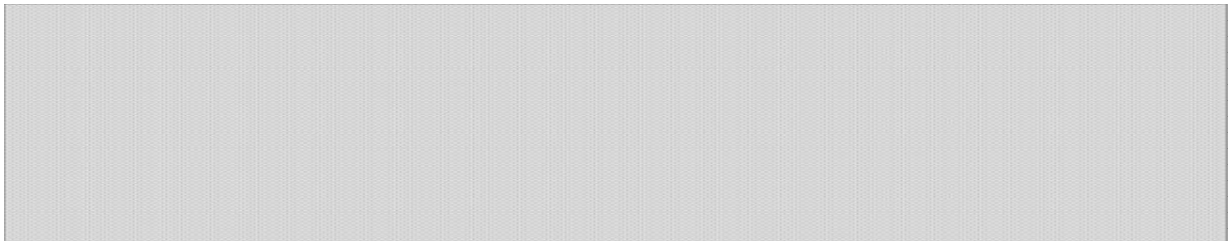
표 13 | 세계 양자 통신소자 시장 전망

구분	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
시장 규모 (백만 달러)							
성장률							
구분	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
시장 규모 (백만 달러)							
성장률							

출처: ETRI 기술경제연구본부(2016.12)

나. 양자 소자/계측 시장 전망

(1) 양자 중력센서



<분석 가정>

- 양자센서 시장 전망치에 대한 자료가 부재하기 때문에, 기존 센서시장 전망자료를 토대하여, 향후 양자 센서가 기존 센서 시장을 대체할 비율(대체율)을 가정하여 전망
- ① BCC Research(2016)자료는 '16년과 '21년의 기존 센서의 글로벌시장 규모를 전망하고 있는데, 두 개년도의 5년간 연평균 성장률을 적용하여 '17~'20년의 시장 규모를 산정
- ② '22년 이후 시장은 이전 3개년('22년의 경우 19~21년) 각 시장 성장률에 가중치(0.2, 0.3, 0.5)를 적용한 이동 평균값을 통해 추정
- ③ 앞서 추정된 기존 시장 전망치에 전문가 인터뷰를 통해 도출된 양자 센서의 시장대체율을 적용하여 양자 센서 시장을 추정

표 14 세계 부하/힘/회전 센서 시장 전망

구분	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
시장 규모 (백만 달러)											
성장률											
구분	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
시장 규모 (백만 달러)											
성장률											

출처: BCC Research(2016)를 토대로 '22년 이후는 ETRI 기술경제연구본부 추정(2016.12)

- (시장 대체율) 전문가들은 양자 중력센서가 부하/힘/회전 센서를 완만한 속도로 대체할 것으로 예상했으며, 이를 토대로 아래의 대체율을 가정

표 15 양자 중력센서의 부하/힘/회전 센서 시장 대체율

2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
10%	10%	10%	12%	12%	14%	14%	16%	18%	20%

표 16 세계 양자 중력센서 시장 전망

구분	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
시장 규모 (백만 달러)										
성장률										

출처: ETRI 기술경제연구본부(2016.12)

(2) 양자 전자기센서

표 17 세계 SQUID 센서 시장 전망

구분	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
시장 규모 (백만 달러)											
성장률											
구분	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
시장 규모 (백만 달러)											
성장률											

출처: BCC Research(2016)를 토대로 '22년 이후는 ETRI 기술경제연구본부 추정(2016.12)

- (시장 대체율) 전문가들은 양자 전자기센서가 SQUID 센서를 상당히 빠른 속도로 대체할 것으로 예상 했으며, 이를 토대로 아래의 대체율을 가정

표 18 양자 전자기센서의 SQUID 센서 시장 대체율

2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
15%	15%	20%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%

표 19 세계 양자 전자기센서 시장 전망

구분	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
시장 규모 (백만 달러)										
성장률										

출처: ETRI 기술경제연구본부(2016.12)

(3) 양자 이미지센서

표 20 세계 이미지센서 시장 전망

구분	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
시장 규모 (백만 달러)											
성장률											
구분	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
시장 규모 (백만 달러)											
성장률											

출처: BCC Research(2016)를 토대로 '22년 이후는 ETRI 기술경제연구본부 추정(2016.12)

- (시장 대체율) 전문가들은 양자 이미지센서가 기존 이미지 센서를 완만한 속도로 대체할 것으로 예상했으며, 이를 토대로 아래의 대체율을 가정

표 21 양자 이미지센서의 기존 이미지센서 시장 대체율

2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
10%	12%	14%	16%	20%	22%	24%	26%	28%	30%

표 22 세계 양자 이미지센서 시장 전망

구분	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
시장 규모 (백만 달러)										
성장률										

출처: ETRI 기술경제연구본부(2016.12)

다. 양자컴퓨터 시장 전망

(1) 양자 컴퓨터시스템

- (슈퍼컴퓨터 출하량) 향후 양자컴퓨터가 기존 슈퍼컴퓨터 시장을 대체한다는 가정 하에, 연관시장인 세계 슈퍼컴퓨터 시장을 IDC(2016) 자료를 활용하여 '25년까지 시장을 전망

- IDC자료가 '20년까지 전망하고 있으므로, 21~25년 전망치는 '19~ 20년 2 년간의 연평균 성장률로 5년간 동일하게 성장한다고 가정하여 추정

표 23 세계 슈퍼컴퓨터 시장 전망

구분	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
슈퍼컴퓨터 출하량 (대)											
성장률											

출처: IDC(2016)을 토대로 '21년 이후는 ETRI 기술경제연구본부 추정(2016.12)

- (양자 컴퓨터 출하량) 양자컴퓨터 시장규모는 '15년 슈퍼컴퓨터 시장의 0.2% 수준으로, 이를 토대로 '16~25년 양자컴퓨터 출하량을 대수를 추정
 - 현재 유일한 양자컴퓨터 제조업체인 D-wave Systems社의 판매 실적('15년 3대 추정)을 근거할 때, 0.2% 수준임. '25년까지 최대 1%까지 완만한 양자 컴퓨터 출하량을 가정

표 24 '15~'25년 세계 양자컴퓨터 출하량 전망

구분	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
슈퍼컴퓨터 출하량 (대)											
대체비율											
성장률											

출처: IDC(2016)을 토대로 '21년 이후는 ETRI 기술경제연구본부 추정(2016.12)

- '26년 이후의 양자컴퓨터 출하량은 '26년부터 양자컴퓨터가 본격 확산한다는 가정 하에, 유사 사례라 할 수 있는 컴퓨터 시장에서 초기 1 세대 IBM 메인프레임의 13년간의 연간 성장률(1955~1968) 준용하여 산정

표 25 '27~'36년 세계 양자컴퓨터 출하량 전망

구분	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
1세대 메인프레임 성장률(%)										
양자컴퓨터 출하량 (대수)										

비고: 1세대 메인프레임 성장률은 Vijay Mahajan and Eitan Muller 논문(1996) 참고

- 세계 최초의 테라플롭스 슈퍼컴퓨터의 제작비용(5,500만 달러*)에서 세계 최초의 페타플롭스 슈퍼컴퓨터 판매가격(1억 3,300만 달러**)의 성장률 2.42배를 적용
- * 오마이뉴스('14.11.12), “사람의 자리 밀어내는 기계, 망치로 부셔야 할까 - (서평) 인간과 기계의 공생”
- ** 조선일보('08.6.10.), Tistory('08.06.11.) 원정환, “세계서 가장 빠른 컴퓨터 '로드러너' (슈퍼컴퓨터 로드러너, 페타플롭스)”

표 26 세계 양자컴퓨터 시장 전망

구분	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
출하량(대수)							
시장 규모 (백만 달러)							
구분	2033	2034	2035	2036	2037	2038	
출하량(대수)							
시장 규모 (백만 달러)							

출처: ETRI 기술경제연구본부(2016.12)

(2) 양자 컴퓨터소자

- (자체 전망) '20년까지는 Market Research Media(2015)에서 전망한 물리적 QC 디바이스 시장을 활용하고, '21~25년 전망치는 '19~20년 2년간의 연평균 성장률 4.1%를 적용하여 산출

표 27 '15~'25년 세계 양자컴퓨터 소자 시장 전망

구분	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
시장 규모 (백만 달러)											
성장률											

출처: Market Research Media(2014)를 토대로 '21년 이후는 ETRI 기술경제연구본부 추정(2016.12)

- 양자컴퓨터 소자 시장은 '26년 이후 양자컴퓨터 시장과 함께 본격 성장한다고 가정하고, 양자컴퓨터 시장 전망과 같이 1세대 IBM 메인프레임의 연간 성장률(1955~1968) 패턴 적용
- * 양자소자가 양자컴퓨터 시스템의 선행기술로, 독자적 시장을 형성하기 보다는 양자컴퓨터 확산에 의존할 것으로 전제

표 28 '26~'38년 세계 양자컴퓨터 소자 시장 전망

구분	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
시장 규모 (백만 달러)							
성장률							
구분	2033	2034	2035	2036	2037	2038	
시장 규모							
성장률							

출처: ETRI 기술경제연구본부(2016.12)

(3) 양자 컴퓨터 소프트웨어(SW)

- (자체 전망) Market Research Media(2014)가 전망한 QC 시뮬레이션 시장과 QC 프로그래밍 인프라 시장을 합한 시장을 양자SW 시장으로 인식하였고, '21~25년 전망치는 '19~20년 2년간의 연평균 성장률 17.4%를 적용

표 29 '15~'25년 세계 양자SW 시장 전망

구분	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
QC 시뮬레이션											
QC 프로그래밍 인프라											
합계 (백만 달러)											
성장률											

출처: Market Research Media(2014)를 토대로 '21년 이후는 ETRI 기술경제연구본부 추정(2016.12)

- 양자SW 시장은 '26년 이후 양자컴퓨터 시장과 함께 본격 성장한다고 가정하고, 양자컴퓨터 시장 전망과 같이 1세대 IBM 메인프레임의 연간 성장률(1955~1968) 패턴 적용

표 30 '26~'38년 세계 양자SW 시장 전망

구분	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
시장 규모 (백만 달러)							
성장률							
구분	2033	2034	2035	2036	2037	2038	
시장 규모							
성장률							

출처: ETRI 기술경제연구본부(2016.12)

3. 기술분야별 활용 전망

☐ 상업적 활용시기 및 시장 전망

- 양자정보통신은 미래 컴퓨팅 패러다임을 완전히 바꿀 수 있는 대표적인 변혁적 (disruptive) 기술로 해외도입이 어렵고 민간이 선제 투자하기에 위험도가 높은 분야
 - 주요 양자정보통신 기술의 상업적 활용가능 예상 시기는 다음 <표>와 같음
 - 양자암호통신, 양자시스템을 위한 소자 등 상업적 활용 가능성이 가시화되고 있는 분야부터 단계적으로 기술역량 축적 필요

표 31 | 상업적 활용 가능 양자정보통신 기술

구분	주요 개발 내용
단기 (‘15~’20년)	<ul style="list-style-type: none"> · 양자시스템을 위한 부품 · 양자시계 · 비의료 이미징 기술 (전자기장 및 중력 이미징, 단일 광자 이미징) · 양자암호통신 (양극단 암호통신)
중기 (‘20~’25년)	<ul style="list-style-type: none"> · 의료 이미징 기술 · 항법기술 (정밀 관성항법장치) · 차세대 부품 (가속도계와 같은 고체상태 축소·자립형 양자기기)
장기 (‘25년 이후)	<ul style="list-style-type: none"> · 양자암호통신 (복잡형 네트워크 커뮤니케이션) · 소비자용 기기에서의 양자기술 · 양자컴퓨팅

출처: A roadmap for quantum technologies in the UK (2015.9)

☐ 주요 기술분야별 활용 전망

- (양자암호통신) 보안이 중요시 되는 국방, 국가 공공 인프라, 금융 등에 대해 양자 암호통신 적용 필요성 증대 → 보안성 강화가 시급한 분야부터 점진적 적용 전망
 - IQC(캐나다 워털루대)는 양자암호통신 시장은 보안의 중요도에 따라 4개 단계로 확산 예상
 - * 1단계: 정부, 국방, 연구소 → 2단계: 금융기관 및 대기업 → 3단계: 에너지 등 공공재 (Public Utilities) 분야, 중소기업 → 4단계: 기타 이용자
 - (국방) 주요 군사 무기 및 군사 기밀통신 분야에 최우선적으로 적용될 전망
 - * 스노든 사건(2013년) 미국 국가안보국(NSA) 광통신망 보안시스템 접촉, 최고 기밀정보를 유출한 사건으로, 양자암호통신망 기반이었으면 예방 가능한 사건임
 - (공공 인프라) 국가의 행정망, 전기·가스·수도·원자력, 연구개발, 의료 등 공공성이

높은 국가 인프라 분야에 적용 전망

- (금융) 최근 핀테크(Fintech) 산업이 급속히 확산되고, 금융기관의 해킹 사고 우려 등을 볼 때 양자암호통신 도입 가능성 증대
- (양자소자계측) 자기장, 중력, 빛 등의 영향에 따른 양자 상태 변화를 이용하여 초정밀 계측을 가능케 하는 기술로, 위치정보, 자원탐사의 정확도 등을 고도화할 수 있으며, 초고해상도 이미징 분석 및 초정밀 자기 공명장치(MRI) 등에 적용 가능
 - (양자 중력 센서) 해저 및 지하, 건물 내부의 지형/구조/밀도를 3D 지도로 제작이 가능하며, 보다 정확하게 석유, 가스, 광물의 위치를 찾아내어 효율적인 자원의 채굴 정보를 생성
 - (양자 전자기 센서) 높은 정밀도로 고주파 신호 측정, 스텔스 감지 등에 활용가능하며 뇌신호 측정을 이용한 보다 정밀한 MRI 장치 등에 활용
 - (양자 이미지 센서) 고해상도(고집적도), 초소형, 초절전형 특성으로, 차세대 의료영상장치, 생체조직 영상장비 등에 활용
 - 양자소자가 우선적으로 적용될 것으로 예상되는 시장은 중력센서, 이미지 센서, 전자기 센서, 암호통신용 단일광자 측정 센서 등으로 예상
 - 10년 이내 자동차, 건설 등에서의 대용량 응용용 양자 센서와 포켓용 양자 네비게이션 기기가 등장하고, 10년 후에는 중력 센서 기반의 중력 이미지 기기가, 20년 정도의 미래에는 모바일 기기를 포함한 소비자 용품에 통합된 양자 센서가 등장할 것으로 예상
- (양자컴퓨팅) 슈퍼컴퓨터로도 장시간이 소요되는 특정분야 연산을 단시간 내 처리할 수 있어, 금융, 신약개발, 인공지능, 기후분석 등의 분야에 클라우드 기반 컴퓨팅 및 고성능-절전형 슈퍼컴퓨팅으로 활용될 전망
 - 초기(1~2단계)에는 슈퍼컴퓨터 연산을 위한 보조프로세서로써 양자컴퓨터가 활용되다 점차 슈퍼컴퓨터의 중추적 형태로 발전될 전망
 - 범용 양자컴퓨터는 2020년대 중반 연구개발용으로 시작되어 2030년 경 상용화가 전망
 - 전 세계 유일한 양자컴퓨터 제조업체인 캐나다의 D-wave Systems사는 '11년 128큐비트의 양자컴퓨터`D-wave one`을 개발, '13년에는 512큐비트의 `D-wave two`를 개발하여 '14년 2대, '15년에 3대를 구글과 NASA 등에 판매한 것으로 알려짐
 - 그러나 이 컴퓨터는 기존의 어닐링 방식을 양자 어닐링 방식으로 대체한 특수목적형 컴퓨터로 일반적인 뜻의 양자컴퓨터와는 거리가 멀다고 평가도 존재

표 32 양자 컴퓨터 구현 3단계

구분 (구현 시점)	주요 개발 내용
1세대 양자컴퓨터 (현재)	· (물리적 큐비트 단계) 에러 정정 기능 없이 수백 개의 큐비트로 이루어진 초기 단계의 양자컴퓨터로 최적화 문제 해결 가능 (현재 D-Wave 수준)
2세대 양자컴퓨터 (10~15년 이후)	· (논리적 큐비트 및 양자시뮬레이터 기술 확보) 에러 정정이 가능할 정도로 높은 신뢰성 갖는 소자 구현과 물리, 화학, 재료, 신약 분야 연구에 응용될 시뮬레이터가 확보된 단계의 양자 컴퓨터
3세대 양자컴퓨터 (20년~ 이후)	· (범용 양자컴퓨터 시스템 확보) 위상학적 큐비트 소자 등 비교적 쉽게 에러 정정이 가능하도록 구현된 양자컴퓨터로 현재 디지털 컴퓨터와 1:1 성능 호환 가능

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

- **(양자컴퓨팅 소자)** 다중 논리 큐비트, 반도체 양자칩 큐비트, 입출력 제어 소자, 양자 메모리, on-chip 소자 등의 핵심 구성품 개발 없이는 양자컴퓨터 시스템을 자체 제작은 불가
 - 전 세계적으로 다양한 물리계를 이용하여 다중 Physical 큐비트 소자를 구현하고 성능을 평가한 연구 결과들은 존재 하나 아직 Logical 큐비트의 구현까지는 이르지 못한 실정
 - 양자 컴퓨터소자는 20년대 중반까지는 시험용, 연구개발용으로 개발되어 판매되다가 2030년 경 양자컴퓨터의 상용화와 함께 출시될 전망
 - 고성능 Logical 큐비트 소자를 구현하고, 성능을 평가하는 연구를 조기에 착수하여 선진 기술을 확보하는 것이 필요한 시점
- **(양자컴퓨터 SW)** 고전 데이터 처리에 대한 효율적인 양자화를 위해서는 양자 시뮬레이터와 양자 SW 플랫폼이 필요하며 양자컴퓨팅을 이용한 응용 기술의 급격한 기능 향상을 위한 응용 SW 패키지가 필요
 - * (양자시뮬레이터) 물질 또는 화학 반응을 모의 시험하는 특수목적에 활용되며, 모의시험은 에너지 또는 운송 같은 다양한 부문에 필요한 새로운 물질을 설계하는 도구로서 그 물질이 개발되기 전에 새로운 프로세스 또는 성질을 탐구할 수 있게 해줌
 - 양자컴퓨터 응용 SW 패키지와 범용 양자컴퓨터 구동을 위한 양자 시뮬레이터 및 SW 플랫폼은 20년대 중반까지는 시험용, 연구개발용으로 개발되어 판매되다가 2030년 경 양자컴퓨터와 함께 본격적인 상용화가 예상
 - * IBM은 이미 '16년에 양자 연산 클라우드 서비스를 시작하였고, 다수의 업체들이 인공지능과의 이를 접목을 추진하고 있어, 양자 소프트웨어 개발 속도가 더욱 가속화 될 것으로 예상

III 양자정보통신 기술개발 사업 타당성 분석

1. 사업의 개요

■ 사업의 비전 및 목표

양자정보통신 기술개발 사업의 비전 및 목표

비전	2020년, 양자정보통신 글로벌 선도국가 진입 2025년, Q-ICT 산업혁명 선도
사업목적	ICT 차세대 기술경쟁력 우위 확보를 위한 양자정보통신 미래기술 및 융복합 에코시스템 확보
세부 추진목표	

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

■ 사업의 범위

양자정보통신 기술개발 사업의 범위

사업범위	양자통신	
	양자 소자·부품 및 응용계측	
	양자컴퓨팅	

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

기술개발 세부내용: ① 양자통신

표 33 양자통신 분야 기술 분류체계

대분류	중분류	개발 과제
① 양자통신		

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

표 34 양자통신 분야 개발과제별 세부 기술내용

개발 과제	기술개발 내용	소요예산		
		개발기간	소요예산 (연간)	TRL 목표

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

기술개발 세부내용: ② 양자 소자/계측

표 35 양자 소자/계측 분야 기술 분류체계

대분류	중분류	개발 과제
② 양자 소자/계측		

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

표 36 양자 소자/계측 분야 개별과제별 세부 기술내용

개발과제	기술개발 내용	소요예산		
		개발기간	소요예산 (연간)	TRL 목표

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

기술개발 세부내용: ③ 양자컴퓨터

표 37 양자컴퓨터 분야 기술 분류체계

분류	중분류	개발 과제
③ 양자 컴퓨터		

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

소요예산

--

표 39 양자정보통신 기술개발 총사업비 구성

		금액 (억 원)	구성비
총사업비			
전략 기술개발			
연구 장비구축			
센터 운영			

출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서

2. 타당성 분석 방법론

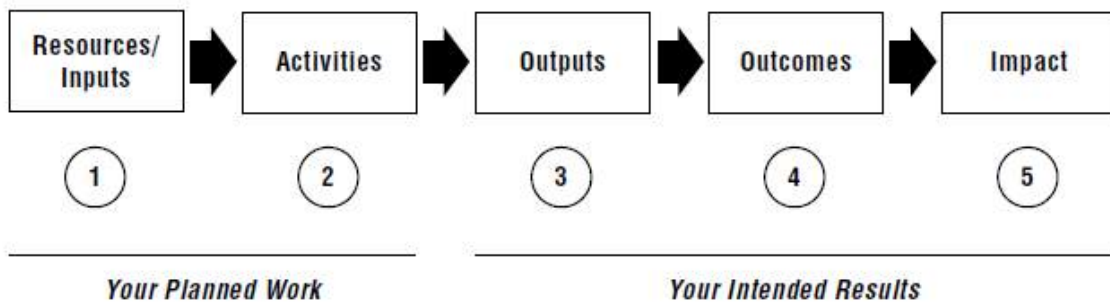
■ 사업계획에 대한 타당성 분석

- 사업(program)이란 특정한 배경 하에서 특정 목표를 달성하기 위해 여러 가지 자원을 투입하고 관련된 활동을 수행하여 산출물과 성과를 생성하는 일련의 작업임
 - 사업계획은 사업이 기획된 대로 시행되면 의도한 결과가 달성될 것이라는 일종의 가설
 - 잘 수립된 사업계획은 왜 해당 사업을 추진하여야 하며, 사업이 무엇을 달성하고자 하고, 어떻게 달성할 것이고, 어떤 활동을 수행하여, 어느 정도의 성과를 창출하고, 그 성과를 어떻게 측정하고 평가할 지에 대해 충분한 정보를 포함해야 함
- 충실한 사업 기획을 위해 ‘국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정’ 제4조(사전조사 및 기획) 제1호에서는, ‘중앙행정기관의 장은 국가연구개발사업을 추진하려는 경우, 그 사업의 기술적·경제적 타당성 등에 대한 사전조사 또는 기획 연구를 수행’할 것을 명시
 - 국가연구개발사업의 기획을 위한 구성요소에 대한 획일적인 기준은 없으나, 구체화된 국가연구개발사업의 기획안에는 다음과 같은 사항들이 포함되어야 함*
 - * 국가과학기술위원회(2011), 정부R&D 투자 효율화 추진계획
 - 사업의 목표, 세부추진내용 및 추진체계
 - 다른 중앙행정기관의 소관 업무와 관련되는 사항에 대한 조정방안 (해당되는 경우)
 - 사업의 평가계획
 - 필요한 자원의 규모 및 인력 확보방안
 - 정부지원의 타당성 검토 결과
 - 연구개발성과의 활용방안 및 기대효과
 - 국내외 특허 동향, 기술 동향, 표준화 동향 및 표준특허 동향
- 연구개발사업의 비정형성* 및 경제성 분석의 한계점 등을 고려한 타당성 분석방법의 적용이 필요
 - * 연구개발사업은 주로 과학기술분야에 초점이 맞춰져 있고, 새로운 지식을 얻거나 이를 응용하는 창조적 활동이라는 연구개발의 개념상 비정형성이 두드러짐(OECD, '02)

☛ 타당성 분석 방법론 : 논리모형(logic model)

- 논리모형은 각종 사업의 기획, 관리, 평가에 적용되는 방법 중의 하나로써, 어떻게 사업을 추진할 것인지를 나타낸 개념도로 정의할 수 있음
 - 논리모형은 사업(program)의 작동과 관련된 항목 간의 논리적 연관성을 확인하는 모델로서, 사업관련 활동과 결과가 최종목표에 어떻게 연계되는지를 보여줌
 - 사업을 작동시키는 투입자원, 활동, 그리고 달성할 결과 사이의 관계를 나타내고, 관계자들의 이해도를 높이는 체계적이고 시각적인 방법임

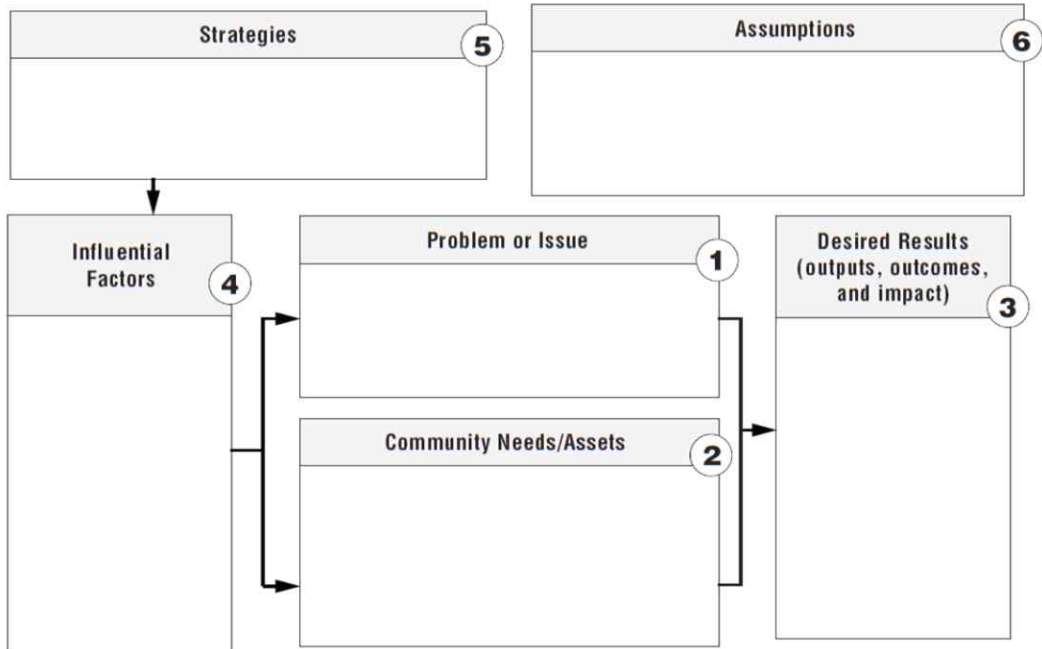
논리모형(logic model)의 기본



출처: W.K. Kellogg Foundation(1998), Logic Model Development Guide; "with the permission of the W.K. Kellogg Foundation"

- 사업계획의 전반적인 작동논리를 분석함으로써, 사업 추진의 필요성 및 시급성, 사업 계획의 충실성 및 성공가능성과 파급효과를 검토하여 사업추진의 타당성 여부를 결정
 - 사업 기획 이유부터 최종 파급효과 확산까지의 쉼 과정이 적절하고 합리적으로 설정 되어야 하며, 각 단계 간 인과관계에 바탕을 두고 논리적으로 설명할 수 있어야 함
 - 사업계획에 대한 논리모형을 수립함으로써, 평가자는 해당 사업의 기획주체가 생각하는 사업의 작동 메커니즘을 이해할 수 있음
- 논리모형은 특별하게 정형화된 것이 아니라, 정보의 종류와 수준에 따라 기본항목으로 구성된 모형부터 세부적으로 구체화된 모형까지 다양한 형태로 구성이 가능함
 - 사업의 추진단계 및 활용목적에 따라 강조하려는 사항이 다르므로, 필요에 따라 다른 형태의 논리모형을 구성할 수 있음
 - '논리모형을 활용한 사업 계획 수립 템플릿'은 사업의 기획단계 및 사전평가 시 사업의 추진당위성을 파악하는데 유용함

논리모형을 활용한 사업 계획 수립 템플릿



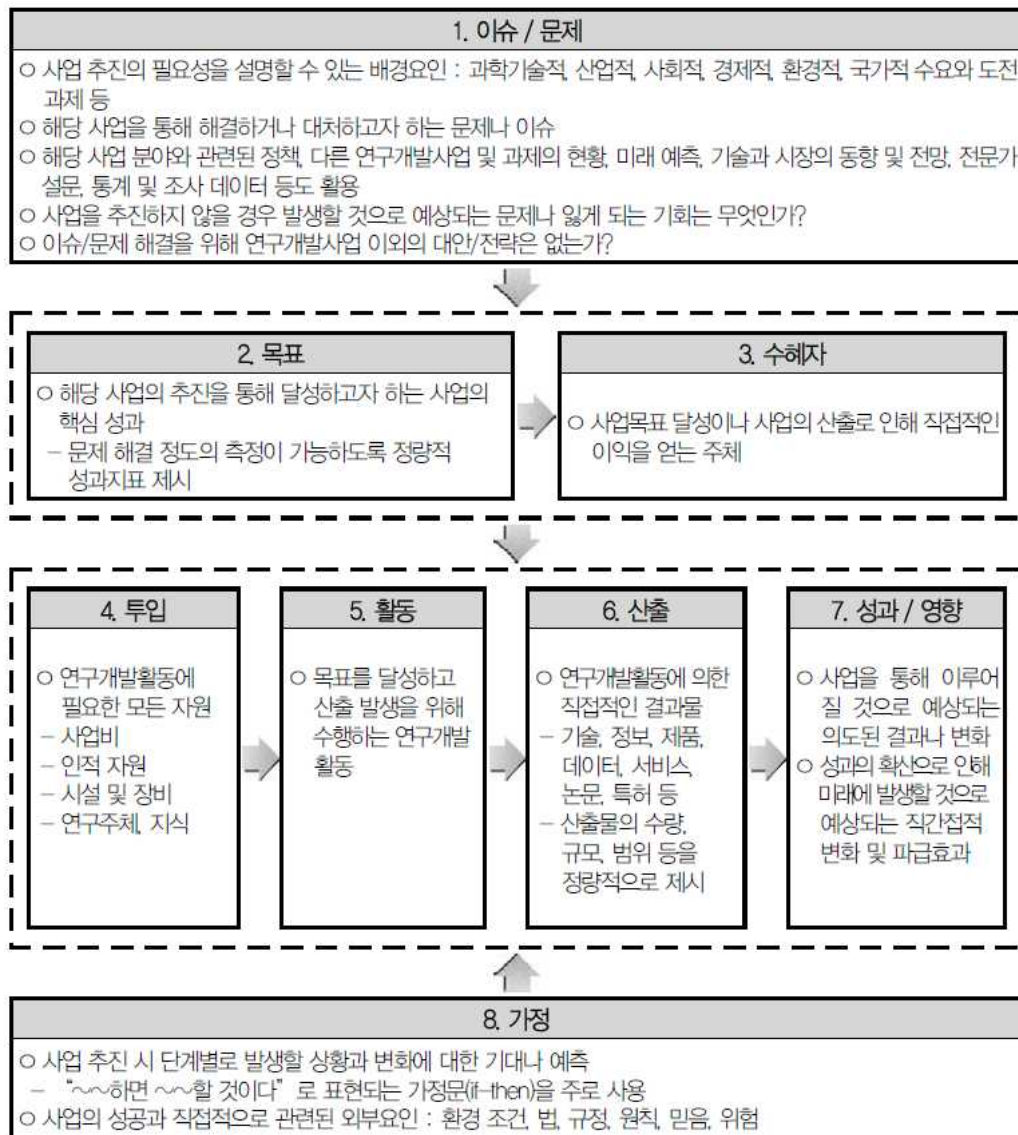
출처: W.K. Kellogg Foundation(1998), Logic Model Development Guide; "with the permission of the W.K. Kellogg Foundation"

- 사업의 수과정을 포괄하는 논리적 연계성을 확보하기 위해 논리모형(logic model)을 활용하는 것이 좋으나, 현재까지 국가연구개발사업의 기획 시에는 잘 활용되지 않았음
- 국가연구개발사업의 기획 시에 논리모형이 잘 활용되지 않았던 주된 이유는 다음 두 가지로 판단됨
 - 첫 번째는 논리모형을 단순히 양식(template) 채우기로 인식하여 유용하지 않다고 생각하기 때문임. 논리모형의 각 구성요소를 채우는 것도 중요하지만, 모형의 진정한 유용성이 발휘 되려면 구성요소 간의 연계성에 바탕을 둔 논리적 흐름을 이어가야 하며, 이를 통해 구상하는 사업에 대한 작동논리를 합리적으로 수립할 수 있음
 - 두 번째는 사업 기획 시에, '우리에게 무슨 문제가 있고, 어떤 문제를 우선적으로 해결해야 하는가?'를 먼저 고민하고, 그 문제 해결을 위해 달성해야 할 목표를 수립한 후, 목표 달성을 위한 활동을 도출하는 순서로 기획하지 않았기 때문임. 단기간에 추진되는 연구개발사업 기획에서는 '무엇을 할 것인지'부터 정해놓고 기획에 착수하기 때문에 논리모형을 활용할 기회와 필요성이 없어짐

논리모형(logic model) 항목

- 논리모형은 연구개발사업의 사전평가에 유용하게 활용될 수 있으며, 현재 연구개발 부문 예비타당성조사에서는 조사 대상사업의 주요쟁점 도출에 활용되고 있음
 - 관련 문헌들과 기존 연구개발 예비타당성조사 사례를 바탕으로 논리모형을 개발하여 ‘연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준지침’에 수록
- 연구개발부문 예비타당성조사에서 사용되는 논리모형의 구조와 항목별로 다루어지는 내용 및 분석 방법은 다음과 같음

연구개발 예비타당성조사를 위한 논리모형



출처: 한국과학기술기획평가원 (2014.11), 연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준지침(제2판)

- 평가자는 사업계획을 충분히 파악하고 이해한 후 논리모형을 작성·검토해야 함
 - 논리모형의 각 항목의 내용은 평가자의 생각이 아니라 대상사업에 대한 사업 기획 주체의 의도와 논리를 담아야 함
 - 논리모형이 작성된 이후에는, 작성된 논리모형의 각 항목별 적절성과 항목간 논리 흐름상 오류나 괴리가 없는지 분석하여 주요 쟁점사항을 도출
 - 구체적으로 사업을 추진하기 위한 이슈/문제, 목표, 대상, 투입, 활동 및 전략, 운영 체계, 산출 및 성과 등이 포함된 사업계획이 잘 수립되어 있는지 확인해야 함
- 이슈/문제(issue/problem)
 - 연구개발사업을 기획하게 된 배경을 설명하고 사업의 추진당위성을 부여하는 항목
 - 대상사업과 관련된 분야에서 어떠한 이슈나 문제가 존재하며, 이를 해결하기 위해 해당 연구개발사업 추진이 가장 효과적인지를 설명할 수 있어야 함
 - 이를 위해 해당 사업의 필요성을 설명할 수 있는 배경요인(contextural factor) : 과학기술적, 산업적, 사회적, 경제적, 환경적, 국가적 수요와 도전과제 등이 포함
 - 사업에서 대처하려는 이슈나 문제가 여러 가지 요인들로 인해 복잡하다면, 해당 사업과 연관성이 가장 높은 요인들로 압축하여 선정해야 함
 - 연구개발사업은 특정 세부분야를 대상으로 하므로, 광범위한 연구분야나 산업분야의 일반적이고 진부한 이슈/문제를 제기하는 것보다는, 사업에서 제안하는 세부분야의 특성과 현황에 기반을 구체적이고 핵심적인 이슈/문제를 선정해야 함
 - 해당 사업 추진의 필요성을 설명하기 위해 사업의 분야와 관련된 정책과 다른 연구 개발 사업 및 과제의 현황, 미래 예측, 기술과 시장의 동향 및 전망, 전문가 설문 조사, 통계 및 조사 데이터들을 활용
 - 제기한 이슈나 문제를 해결하기 위해서 연구개발사업의 추진이 가장 효과적인 전략 인지를 설명할 수 있어야 함
 - 해당 사업을 추진하지 않을 경우 발생할 것으로 예상되는 문제, 또는 잃게 되는 기회는 무엇인가?
 - 도출된 이슈와 문제를 해결하기 위한 방안으로 제안된 연구개발사업 이외의 다른 대안이나 전략은 없는가?

● 목표(objective)

- 목표는 해당 사업의 추진을 통해 달성하고자 하는 사업의 핵심 성과
- 목표는 해결하고자 하는 이슈나 문제와 관련이 있어야 하며, 해당 사업을 통해 그 이슈와 문제가 해결될 수 있어야 함
- 사업목표는 해당 사업을 통해 이슈와 문제가 어느 정도로 해결될 수 있는지 측정이 가능하도록 정량적으로 제시되어야 함. 따라서 목표는 SMART(Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Time-bound)해야 함
- 목표는 구체성과 측정가능성을 기준으로 볼 때 목적과는 구분되는 개념임
- 목표는 사업이 달성하고자 하는 바를 의미하므로 이슈/문제 및 성과/영향과 연계하여 분석

● 수혜자(beneficiary)

- 사업목표 달성이나 사업의 산출로 인해 직접적인 이익을 얻는 편익수혜자를 의미
- 수혜자는 목표와 밀접한 관계가 있어야 하며, 경제성 분석은 수혜자가 얻게 되는 직접적인 경제적 편익을 바탕으로 해야 함

● 투입(input)

- 투입은 연구개발 활동에 필요한 모든 자원을 의미. 투입의 기본 항목은 재정적 자원과 인적 자원이며, 연구시설·장비, 지적재산권 등도 포함
- 일반적으로 연구개발 사업에서는 총사업비라는 형태로 표현

● 활동(activity)

- 목표를 달성하고 산출을 발생시키기 위해 수행되는 행위
- 일반적으로 000 기술개발, 000 연구기반구축 등이 연구개발 활동에 속하며, 각 연구개발 활동은 요소기술 개발 등의 세부 연구개발 활동으로 세분화 될 수 있음

● 산출(output)

- 산출은 연구개발 활동을 통한 직접적인 결과물을 의미
- 일반적으로 연구개발 활동으로 개발된 기술(논문·특허 포함), 정보·데이터, 제품, 서비스 등이 해당되며, 각각의 산출물들은 수량, 규모, 범위 등이 제시되어야 함

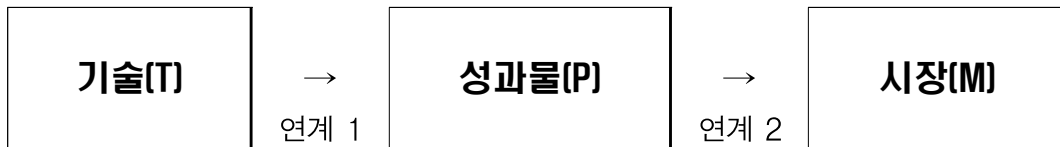
● 성과/영향(outcome/impact)

- 성과(outcome)는 사업의 목표와 밀접한 관련이 있으며 사업 추진과정에 따른 변화나 사업결과(output)의 활용을 통해 이루어질 것으로 예상되는 의도된 결과이며,
- 영향(impact)은 성과의 확산으로 인해 미래에 발생할 것으로 예상되는 직·간접적 변화 및 파급효과를 의미
- 경제성 분석은 연구개발사업으로 인한 직접적인 경제적 성과를 추정. 직접적인 경제적 성과 이외의 성과와 간접적 파급효과는 정책적 타당성 분석의 특수평가 항목을 통해 정리될 수 있음

< 경제성 분석에 대한 T-P-M 연계성 검토 >

● 기술개발의 부가가치 편익은 대개 R&D성과물을 매개로 하여 추정

- 이는 대개 R&D의 범위가 시장의 제품으로 직접 정합되는 경우보다 제품의 특정기술 부분에 한정되는 경우가 많기 때문임



< 기술(T) - 성과물(P) - 시장(M) 연계성 검토 >

● [연계 1] 개발기술(technology) - R&D 성과물(prototype) 관계

- 성과물이 개발기술을 적절히 대표하는가?
 - 대상 기술범위(quantity) : 과소(기술 > 성과물), 적절, 과대(기술 < 성과물)
 - 대상 기술수준(quality) : 과소(기술 > 성과물), 적절, 과대(기술 < 성과물)

● [연계 2] R&D 성과물(prototype) - 분석시장 (market) 관계

- 분석시장은 R&D 성과물의 연관시장을 적절히 대리하는가?
 - 시장전망데이터와 성과물과의 연관성
 - 분석 가정의 타당성 (예: 시장성장율, 시장점유율(TRL 고려, 시장진입가능성) 등)

● [연계 1]의 정합성과 [연계 2] 정합성 간의 적절한 타협이 필요

- 신기술 R&D에는 [연계 1, 2] 간의 풍선효과* 존재 가능성이 높으므로, 모두를 만족시키기 어렵고 적절한 수준의 타협이 필요

* [연계 1] 정합성 강화 → [연계 2] 정합성 약화, [연계 2] 정합성 강화 → [연계 1] 정합성 약화

출처: ETRI 기술경제연구본부(2017.2)

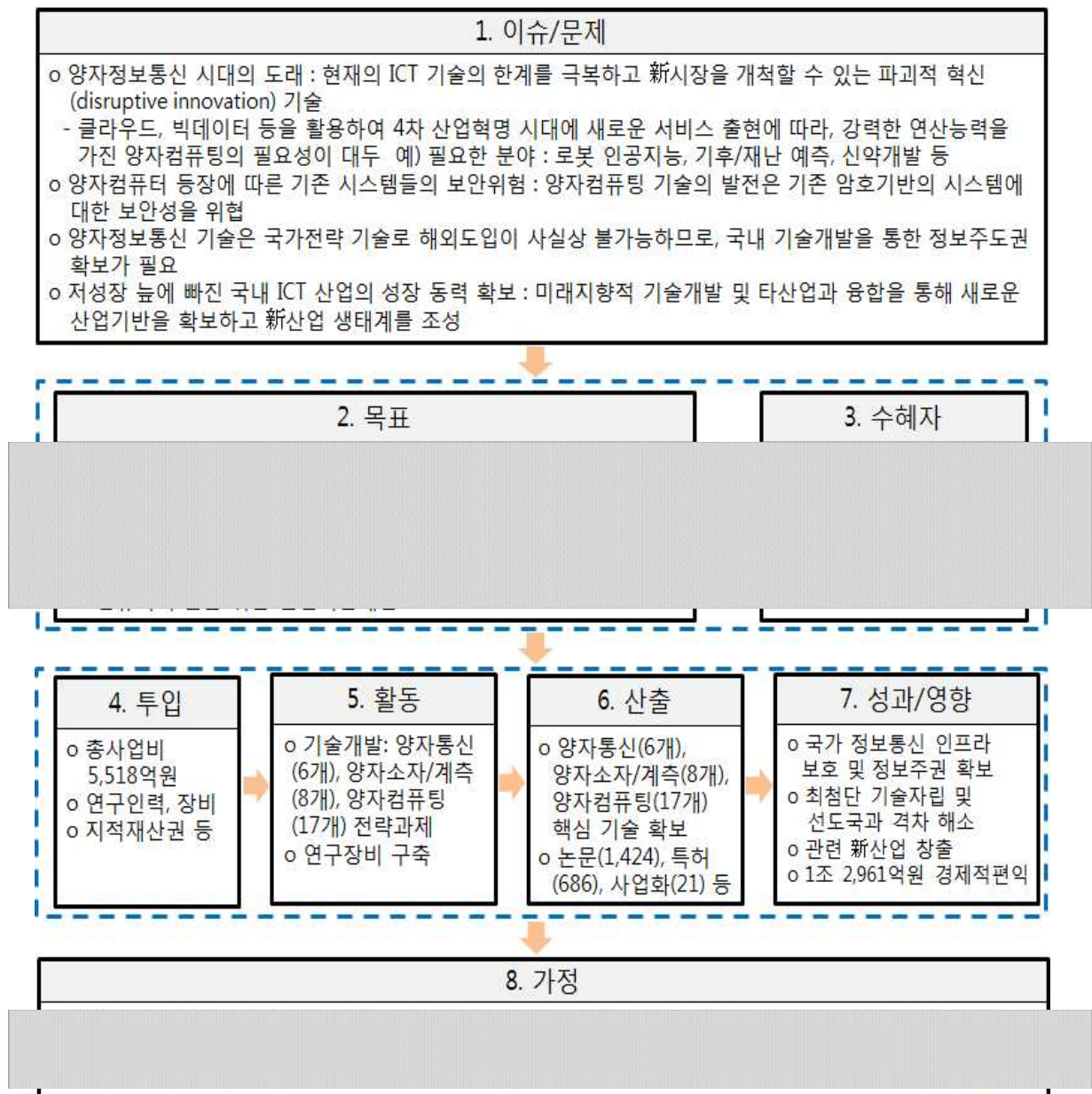
● 가정(assumption)

- 가정은 사업 추진 시 논리모형의 각 항목별로 발생할 상황과 변화에 대한 기대나 예측을 의미
- 사업계획은 그 자체가 기획된 대로 수행하면 기대하는 결과가 생성될 것이라는 가설이며, 가정은 사업의 유효성에 대한 믿음임

3. 기술개발 사업에 대한 타당성 분석

- 논리모형을 활용해 ‘양자정보통신 중장기 기술개발 사업’에 추진에 대한 타당성을 분석하여, 문제점을 파악하고 수정·보완 방향을 도출하고자 함
 - 논리모형의 각 항목의 내용을 양자정보통신 중장기 기술개발 사업 기획보고서에 담긴 사업 기획주체의 의도와 논리를 담아 작성해보면 다음 [그림]과 같음

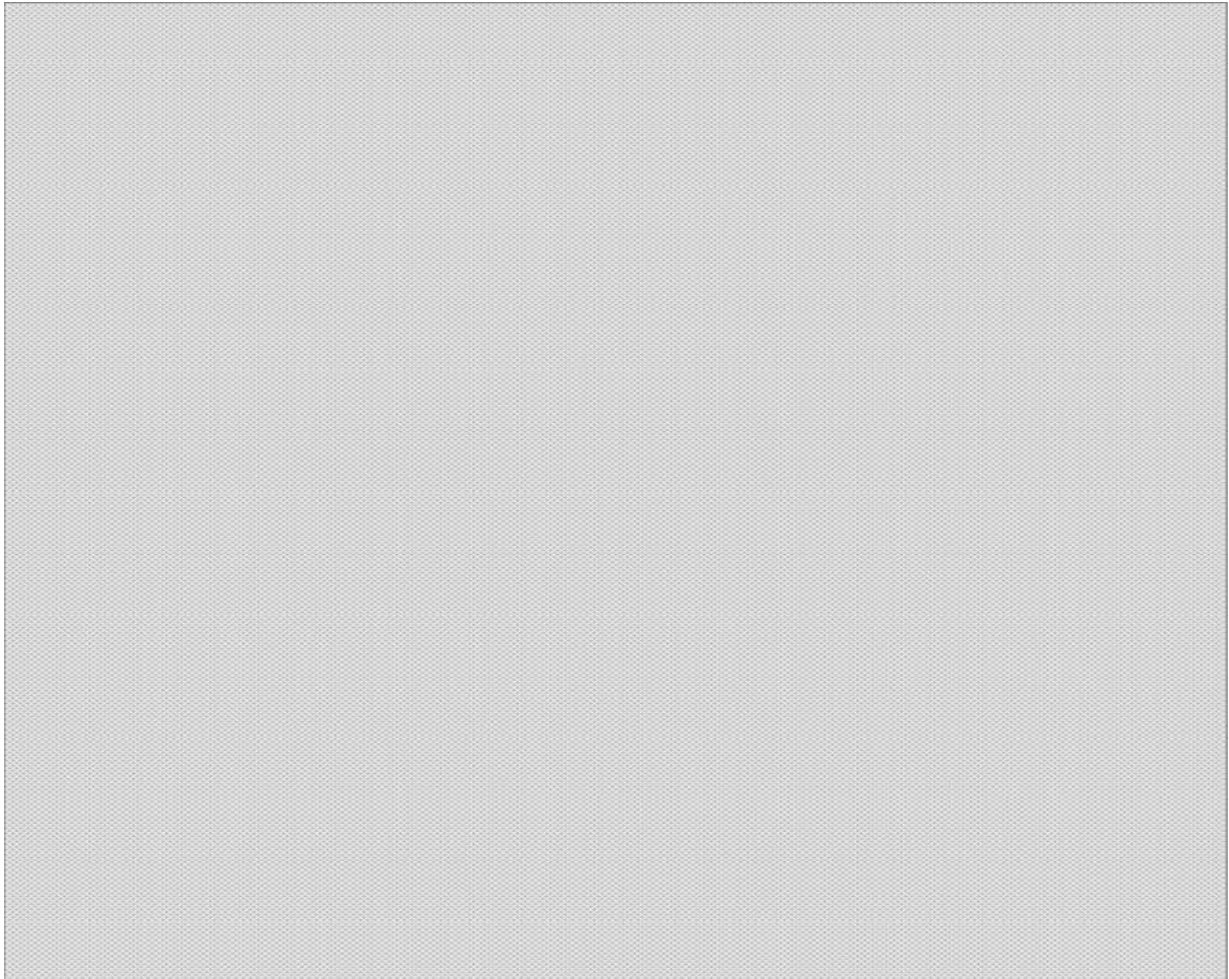
양자정보통신 중장기 기술개발 사업에 대한 논리모형



사업목표의 적절성

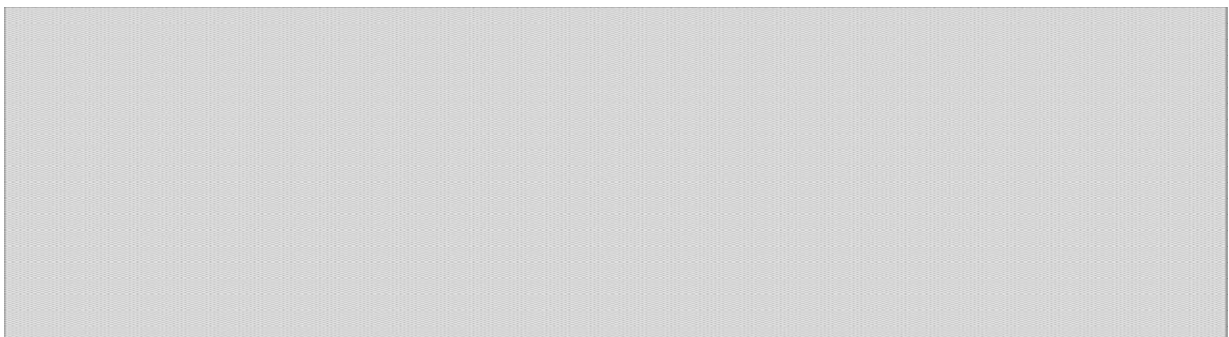
- (이슈/문제의 정의) 동 사업에서 제시하고 있는 해결해야 할 문제점 및 이슈는 거시적인 양자정보통신 연구 개발 추진 필요성 측면에서 적절하게 정의한 것으로 판단됨
 - 양자물리학적 특성을 기반으로 한 새로운 첨단기술로서 충분한 투자 없이 기술 모방이나 도입이 어려운 분야이기 때문에, 정부 차원에서 선제적인 투자와 지원이 필요할 것으로 판단됨
 - 특히, 양자정보통신 원천기술은 파생 기술과 산업 분야에 대한 파급효과가 큰 반면, 전 세계적으로 도입기에 있어 접근방법이 아직 정립되지 않고 개발 성공률이 높지 않은 HR-HR(Hish Risk-High Return)특성 상 산업계에서 전담 개발하기에 어려움이 존재

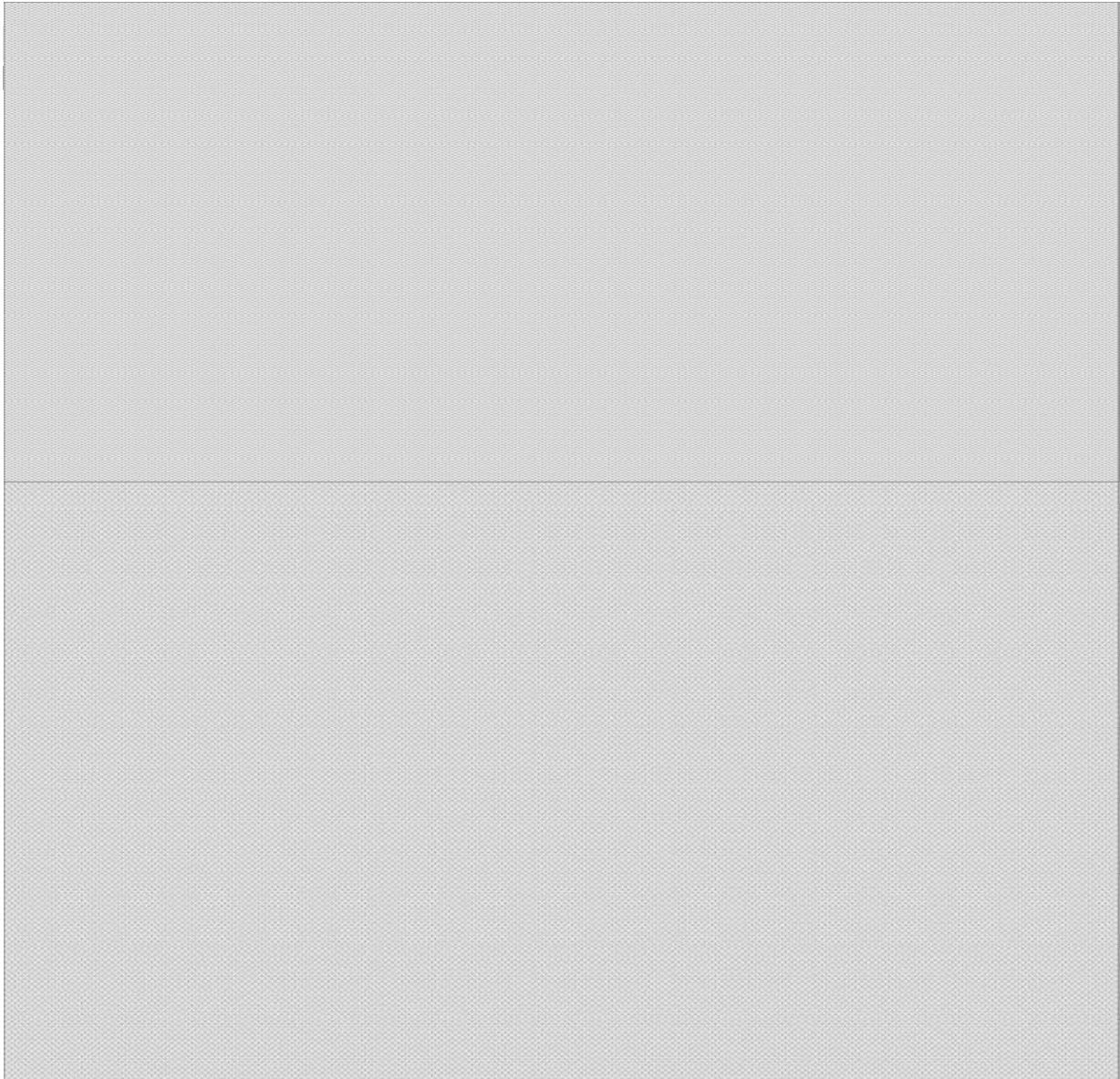
- (목표 설정의 적절성) 양자정보통신 핵심기술 확보 및 기술격차 해소, 이를 활용한 양자정보통신 제품·서비스로 세계시장 공략, 양자기술 적용을 통한 新ICT 산업 및 융·복합 생태계 육성을 사업의 목표 및 추진전략으로 제시하고 있음



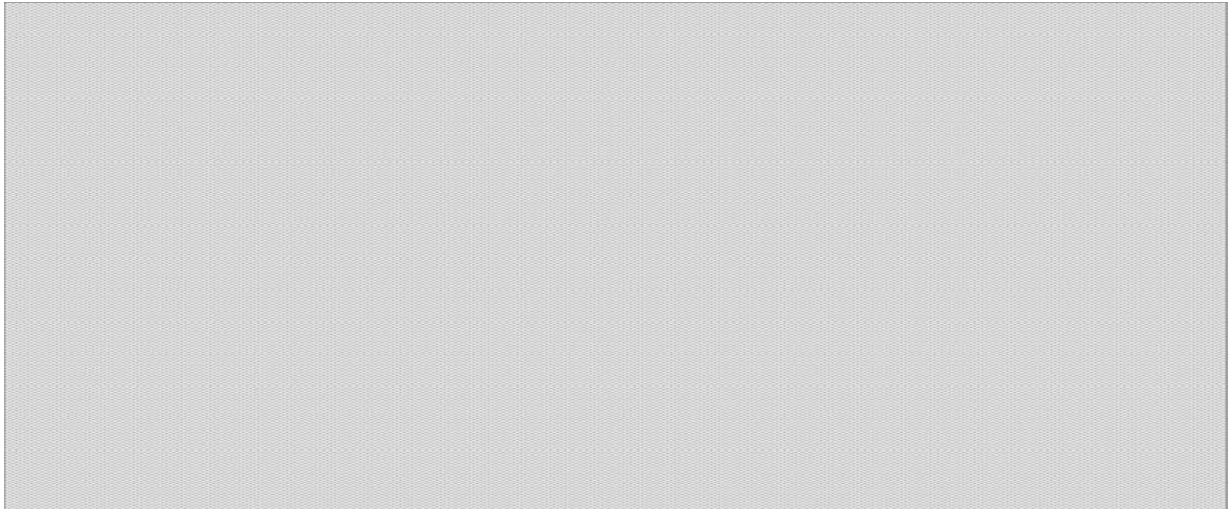
- (정부지원 및 역할의 적절성) 양자통신(차세대네트워크), 양자컴퓨터(초고성능컴퓨터) 등 양자정보통신은 국가과학기술 측면의 경쟁력을 확보하기 위한 핵심 기반 인프라로 관련 법률과 기본계획 등에 근거할 때 정부 지원의 정당성을 확보할 수 있음
 - 미국과 중국이 국가 안보 차원에서 차세대 초고성능컴퓨터 기술을 개발하고 있으며, 미국은 초고성능 컴퓨터를 전략물자로 인식하여 중국 등 경쟁국가에 프로세서 수출을 제한하는 등 기술독점 전략을 추진하고 있음

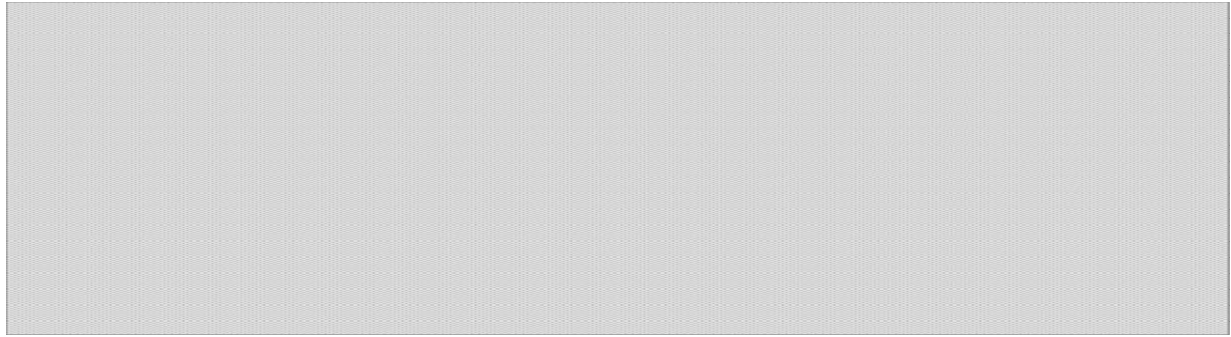
구성 및 내용의 적절성





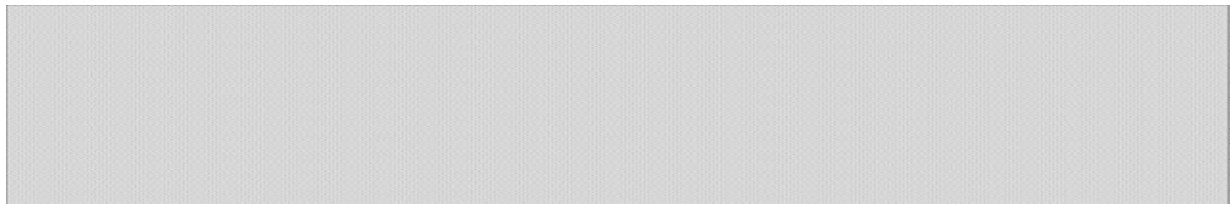
출처: 미래창조과학부(2016), 양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서



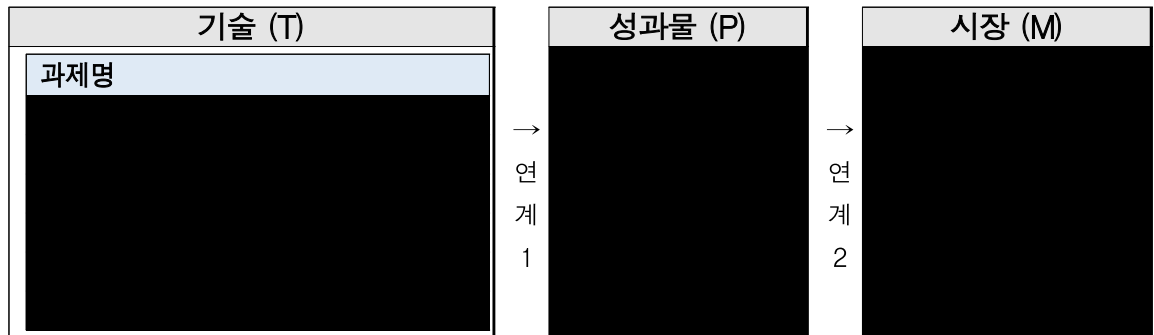


성과/영향 : 경제성 분석

● (양자통신) [연계 1] 성과물이 개발기술을 적절히 포괄하고 있는 것으로 판단

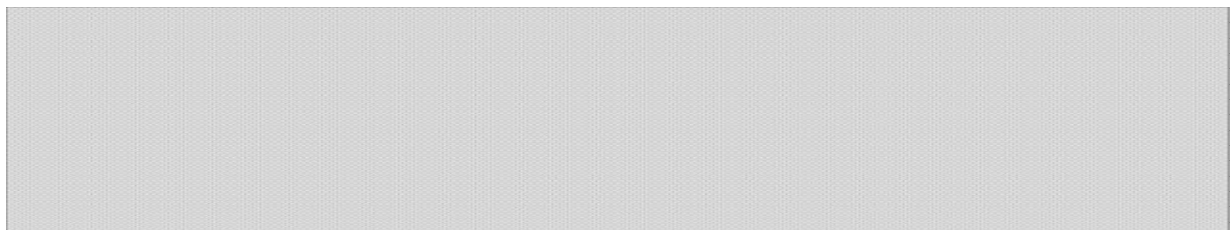
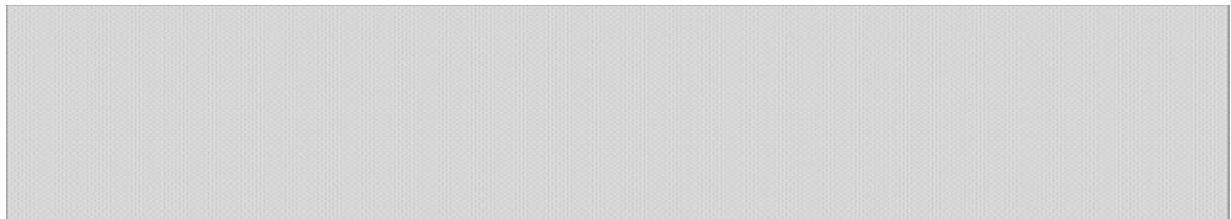


양자통신 분야 T-P-M 연계성 검토



출처: ETRI 기술경제연구본부(2017)

● (양자소자/계측) [연계 1] 성과물이 개발기술을 적절히 포괄하고 있는 것으로 판단



양자소자/계측 분야 T-P-M 연계성 검토



출처: ETRI 기술경제연구본부(2017)

* 대부분 기술의 목표 TRL(Technology Readiness Level; 기술성숙도)이 7보다 낮음

양자컴퓨팅 분야 T-P-M 연계성 검토

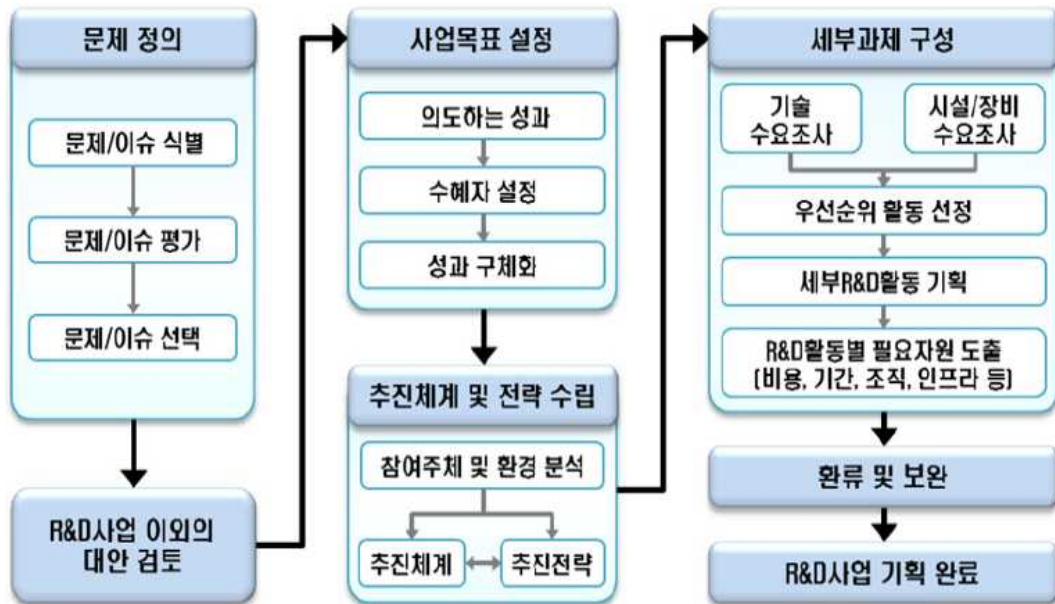


출처: ETRI 기술경제연구본부(2017)

■ 사업기획 시 논리모형의 활용

- 여러 분야를 아우르는 중장기 대형 연구개발 사업은 충분한 사전기획 과정을 거쳐 진행되어야 함. 사업기획 과정 중에 본고에서 언급한 논리모형을 활용하여 사업계획의 합리성 확보 및 타당성 제고할 수 있을 것임
 - 중장기 대형 연구개발 사업은 불확실성, 위험성, 투자회임기간의 장기성, 사업별 상이성과 같은 특성으로 인해 추진일정과 소요예산이 증가될 가능성이 크며, 이러한 문제를 최대한 억제하여 연구목표를 달성하는 것을 연구개발 관리의 핵심이슈로 지적
 - 논리모형은 불확실성이 높은 연구개발사업의 기획역량을 제고하여 사업계획의 완성도를 높여, 사업의 성공가능성을 제고하는데 기여할 수 도구(tool)로 활용 가능
 - 논리모형을 감안한 ‘연구개발 사업의 기획 프로세스’는 다음 [그림]과 같을 수 있음

연구개발 사업의 기획 프로세스



출처: 한국과학기술기획평가원 (2014.11), 연구개발무문 사업의 예비타당성조사 표준지침(제2판)

※ | 참고문헌

- 미래창조과학부. (2016), “양자정보통신 중장기 기술개발 사업기획보고서.”
- 미래창조과학부. (2016), “양자 컴퓨터 발전전략.”
- 미래창조과학부. (2016), “양자컴퓨팅 원천기술 개발 기획보고서.”
- 미래창조과학부. (2016), “초고성능컴퓨팅 사업단 구성·운영(안).”
- 석왕헌·고순주, 한국전자통신연구원(ETRI) 창의미래연구소 IT 이슈리포트. (2013), “미래 유망기술로 부상하는 양자정보통신.”
- 오마이뉴스. (2014), “사람의 자리 밀어내는 기계, 망치로 부셔야 할까? - (서평) 인간과 기계의 공생.”
- 조선일보. (2008), “세계서 가장 빠른 컴퓨터 ‘로드러너’(슈퍼컴퓨터 로드러너, 페타플롭스).”
- 한국과학기술기획평가원. (2005), “한-미 국가 R&D 프로그램 평가의 이론적 배경 및 평가철학 비교분석: Logic Model 적용 및 프로그램 기획에서의 평가를 중심으로.”
- 한국과학기술기획평가원. (2010), “국가연구개발사업 유형별 성과평가 논리모형 개발에 관한 연구.”
- 한국과학기술기획평가원. (2014), “연구개발무문 사업의 예비타당성조사 표준지침(제2판).”
- 한국과학기술기획평가원. (2016), “국가연구개발사업의 기획과 사전평가를 위한 논리모형의 활용.”
- 한국전자통신연구원 내부문서. (2016), “무선양자통신 동향.”
- 한국전자통신연구원 내부문서. (2017), “양자ICT 경제성 분석 문제점 및 개선방향.”
- 홍권기, 정보통신기술진흥센터 주간기술동향 1750호 (2016), “양자암호통신 정책 및 기술 동향.”
- BCC Research. (2016), “Global Markets and Technologies for Sensors.”
- EU. (2016), “Quantum Manifesto: A New Era of Technology.”
- Gartner. (2016), “Semiconductor Forecast Worldwide Revenue 2014~2020.”
- Gartner. (2016), “Forecast: Information Security, Worldwide, 2014~2020.”
- IDC. (2016), “Worldwide HPC Server Shipments by Competitive Segment 2010~2020.”
- Innovate UK and EPSRC. (2015), “A roadmap for quantum technologies in the UK.”

- IQC. (2014), "Quantum Cryptography Market Study and Business Opportunity Assessment."
- MarketsandMarkets. (2012), "Global Photonic Integrated Circuit(IC) & Quantum Computing Market(2012-2022)."
- MarketsandMarkets. (2016), "Terahertz Technology Market Analysis and Forecast to 2022."
- Market Research Media. (2014), "Quantum Computing Market Forecast 2015~2020."
- Ministry of Economic Affairs. (2016), "Quantum Europe 2016, A new era of technology."
- Philip M. Parker, INSEAD. (2015), "The 2016-2021 World Outlook for Quantum Cryptography."
- Technavio. (2016), "Global Laser Diode Market 2016~2020."
- Vijay Mahajan and Eitan Muller. (1996), "Timing, Diffusion, and Substitution of Successive Generations of Technological Innovations: The IBM Mainframe Case."
- W.K. Kellogg Foundation. (1998), "Logic Model Development Guide."

저자소개

송영근 ETRI 미래전략연구소 기술경제연구본부 기술경제연구그룹
책임연구원
e-mail: iesong@etri.re.kr Tel. 042-860-1662

양자 통신/컴퓨팅 도메인 분석

: 시장 전망 및 기술개발사업 타당성 분석

발행인 : 한성수

발행처 : 한국전자통신연구원 미래전략연구소 기술경제연구본부

발행일 : 2017년 12월

ETRI 한국전자통신연구원
미래전략연구소

34129 대전광역시 유성구 가정로 218
전화 : (042) 860-3874, 팩스 : (042) 860-6504

* 주의 : 본서의 일부 또는 전부를 무단으로 전제하거나 복사하는 것은
저작권 및 출판권을 침해하게 되오니 유의하시기 바랍니다.

