

IPv6 기본 개념 및 관련 기술의 이해

김평수

한국산업기술대학교

요약

본 튜토리얼 논문에서는 최근 들어 다양한 형태의 스마트 기기 보급 확산으로 인한 모바일인터넷은 물론 사물인터넷 시대의 도래로 급격히 증가하는 인터넷 주소 수요로 인해 도입의 필요성이 대두되고 있으며 국내·외적으로 적용 확산을 위한 시도가 활발하게 진행되고 있는 IPv6(IP version 6)의 기본 개념과 관련 기술을 표준화 및 논문연구를 중심으로 알기 쉽게 이해시키고자 한다. 첫 번째로, 현재 사용되고 있는 인터넷 프로토콜 IPv4(IP version 4)와의 특징 비교와 주소 및 헤더를 통해 IPv6의 기본 개념을 자세하게 설명한다. 두 번째로, IPv4와 IPv6의 공존과정에서 IPv6의 정착률을 위해 필요한 다양한 전환기술을 접근 방식과 세대별 분류를 통해 설명한다. 세 번째로, 다양한 무선 환경에서의 이동단말의 연속적인 인터넷 서비스를 위한 IPv6 이동성 기술을 중앙 집중형 및 분산형 관리 기반으로 나누어 소개한다. 네 번째로, IPv6 보안측면에서의 이슈를 다루고, 다섯 번째로, 4세대 이동통신망(4G) 대비 10~1,000배의 연결 디바이스를 고려하고 있는 5세대 이동통신망(5G) 네트워크 환경에서 중요한 서비스로 간주되고 있는 사물인터넷 서비스에서의 IPv6의 역할을 다룬다. 마지막으로, 국내외에서 진행된 대표적인 IPv6 상용서비스 사례를 제시한다.

I. 서론

최근 들어, 유·무선 통합 서비스 제공, 스마트 기기 보급 확산 등에 따른 모바일인터넷 서비스의 증가는 물론 사물인터넷 서비스 시대의 도래로 IP 주소 수요는 급격하게 증가하고 있다. 이러한 상황에서, 2011년 2월 국제인터넷주소관리기구(ICANN)은 총 43억 개인 IPv4(IP Version 4) 주소 고갈을 선언하였다. 또한, 같은 해 4월 아태지역 인터넷주소관리기구(APNIC)도 고갈을 선언하고 IPv4 할당 요청 시 1회에 한해 1,024개만 할당하는 내용의 최종 할당정책을 시행하고 있다.

이러한 IPv4 주소 고갈의 가장 현실성 있는 해결책 중의 하나가 바로 IPv6(IP Version 6) 주소 체계로 인식되고 있다. IP 주소 부족 문제가 IP 주소 기반 신규 사업 및 일자리 창출 등 인터넷 기반 경제성장의 걸림돌이 될 것으로 예측되어 세계적으로 IPv6 도입의 필요성이 대두되고 있으며 IPv6 적용도 활발히 진행되고 있다.

해외의 경우를 보면, 비록 북미 중심이기는 하지만 이미 2012년 6월에 Google, Facebook, Yahoo!, AT&T, T-Mobile, COMCAST, Time Warner Cable, Cisco, D-Link 등과 같은 대표적 인터넷 웹사이트, 서비스 사업자 및 라우터 장비 제조업체는 “World IPv6 Launch”를 선포하면서 IPv6는 “Default”라고 표현하였다. 다시 말해서, 해외에서는 이미 IPv6 상용 서비스를 본격 추진하고 있으며, 글로벌 IPv6 시대가 개막되었음을 시사하고 있다. 참고로, 온라인 콘텐츠 및 비즈니스 애플리케이션을 전송, 최적화 및 보호하는 클라우드 서비스 기업인 아카미가 지난 해 발표한 2013년 4분기 인터넷 현황(The State of the Internet) 보고서를 보면 전세계 IPv6 트래픽 비율을 살펴보면 미국과 일부 유럽 국가들이 현재 IPv6의 도입을 주도하는 것으로 나타났다. 상위 10개국 중 7개국이 유럽 국가이며 아태지역에선 일본만이 유일하게 상위 10개국에 포함됐다. 1위는 9.3%의 IPv6 트래픽 비율로 스위스, 그리고 루마니아와 룩셈부르크가 7.9%와 6.7%로 그 뒤를 이었다.

국내의 경우 역시, 미래창조과학부와 한국인터넷진흥원(KISA)를 중심으로 IPv4 부족 문제에 대응하고 IPv6가 원활히 사용될 수 있는 기반을 조성하기 위해 “IPv6 전환 종합지원 체계”를 구축하여 국내 IPv6 전환을 지속적으로 추진하고 있다. 물론, 2000년대 초부터 정부출연연구기관, 장비제조업체, 인터넷 서비스 사업자, 대학, 네트워크 솔루션 업체 등을 중심으로 IPv6 기술에 대한 연구 개발 및 표준화는 물론 시제품 개발을 진행하여 왔다. 최근 들어, IP 기반 모바일인터넷 서비스 및 사물인터넷 서비스 환경이 확산되고 인터넷 가능 단말 기기가 폭발적으로 성장하고 있는 상황에서 정부기관, 유무선 서비스 사업자와 네트워크 장비 제조업체 중심으로 IPv6 전환에 높은 관심을 보이고 있다. KISA의 경우 SKT와 함께 LTE와 와이파이

등 무선망에서 IPv6 서비스를 이용할 수 있는 민관협력사업을 추진 중에 있다.

본 튜토리얼 논문에서는 최근 들어 급격히 증가하는 인터넷 주소 수요로 인해 도입의 필요성이 대두되고 있으며 국내·외적으로 적용 확산을 위한 시도가 활발하게 진행되고 있는 IPv6의 기본 개념과 관련 기술을 표준화 및 논문연구를 중심으로 알기 쉽게 이해시키고자 한다. 첫 번째로, 현재 사용되고 있는 인터넷 프로토콜 IPv4와의 특징 비교와 주소 및 헤더를 통해 IPv6의 기본 개념을 자세하게 설명한다[1]~[6]. 두 번째로, IPv4와 IPv6의 공존과정에서 IPv6의 연락처를 위해 필요한 다양한 전환기술을 접근 방식과 세대별 분류를 통해 설명한다[7]~[13]. 세 번째로, 다양한 무선 환경에서의 이동단말의 연속적인 인터넷 서비스를 위한 IPv6 이동성 기술을 중앙 집중형 관리[14]~[19] 및 분산형 관리[20]~[23] 기반으로 나누어 소개한다. 네 번째로, IPv6 보안측면에서의 이슈를 다루고[24]~[28]. 다섯 번째로, 최근 5G 네트워크 환경에서 중요한 서비스로 간주되고 있는 사물인터넷 서비스에서의 IPv6의 역할을 다룬다[29]~[33]. 마지막으로, 국내외에서 진행된 대표적인 IPv6 상용서비스를 SKT와 T-Mobile의 사례를 들어 제시한다.

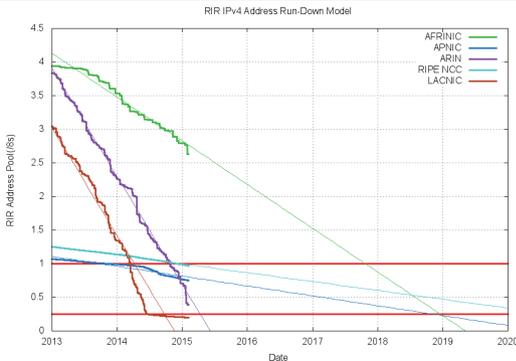


그림 1. IPv6 주소의 감소 곡선 (<http://www.potaroo.net/tools/ipv4>)

II. IPv6 기술 개요

〈그림 1〉에서와 같이 이미 아태지역에서는 새로운 IPv4 주소 할당이 불가능한 상황이며 다른 지역도 크게 다르지 않다. 시점이 다소 늦어지기는 했지만 이미 1990년대 후반부터 예견되어 오던 상황이라 할 수 있다. 1990년대 후반은 가까운 미래에 IPv4 주소 고갈의 문제점이 예상 되면서 미국은 물론 일본, 한국 등 인터넷 주소 사용량의 폭발적 증가가 예상되는 국가들 중심으로 IPv6에 대한 연구 개발이 본격적으로 시작된 시기라 할 수 있다. 이 무렵, 인터넷 분야 국제 표준 기구인 IETF(Internet Engineer Task Force)의 다양한 WG(Working Group)에서는

기본 기술은 물론 전환(Transition) 기술, 보안(Security) 기술, 운용(Operation and Management) 기술, 이동성(Mobility) 기술 등 매우 다양한 IPv6 관련 기술들의 표준화가 진행되었고 많은 기술 규격 RFC(Request for Comments)가 제정되기도 하였다. 사실, IETF에서 IPv6 기술을 다루기 시작한 것은 이미 20년 전이다. IPv6 프로토콜에 대한 기본적인 기능과 구조는 차세대 인터넷 프로토콜 표준화를 다루기 위해 1994년 설립된 IPNG("The Next Generation of the Internet Protocol" 의미를 담고 있음) WG에서 진행되었다. IPNG WG에서는 IPv6 프로토콜의 기본 사양, 주소 할당, 자동 생성들에 대한 표준안으로 개발하였다. 이후, 2001년 설립된 IPv6 WG가 IPNG WG의 표준화 작업을 승계하였으며 IPv6의 현실적인 도입을 위해 개발 중이던 WG 문서들을 중요도에 따라 분류하여 가장 시급한 것부터 먼저 해결하였다[1]~[6].

1. IPv6가 IPv4와 다른 특징

IPv6는 32비트로 구성된 기존 IPv4 주소 고갈 문제를 해결하기 위한 대안으로 고안되었으며 128 비트로 구성된 차세대 인터넷 프로토콜 주소이다. 이론적으로 본다면 현재 사용하고 있는 IPv4 주소는 약 43억(=2³²) 개의 주소를 사용할 수 있지만, 사설용으로 예약된 주소영역과 연구용으로 사용되는 특수영역을 제외한다면 실제로 사용할 수 있는 IPv4 주소의 수는 훨씬 적다. 특수용도를 목적으로 할당된 주소의 개수는 IPv4 주소의 약 7.8%인 3.37억 개로 실제로 할당 가능한 IPv4 주소의 개수는 약 40억 개 보다 약간 적다. 이에 비해 IPv6 주소는 2¹²⁸ 개로 거의 무한대의 주소를 생성할 수 있다. IPv4 대비 IPv6의 주요 특징을 〈표 1〉에서 정리한다.

표 1. IPv4 및 IPv6 특징 비교

	IPv4	IPv6
개발시기	1981년	1998년
주소범위	32비트	128비트
주소개수	약43억개	거의 무한대
주소설정	수동설정	자동설정
보안	IPSec 별도 필요	확장옵션으로 기본제공
이동성	삼각라우팅 이동성	직접라우팅 이동성
품질제어	지원방법없음	품질보장 용이

2. IPv6의 주소 및 헤더 형식

가. IPv6 주소 형식

IPv6 주소를 생성하는 자동설정(Auto-configuration) 방식에는 다음과 같은 두 가지가 있다.

상태 보존형(Stateful) 자동설정 : DHCPv6(Dynamic Host Configuration Protocol version 6) 서버에서 테이블을 관리하면서 IPv6 주소를 분배하는 방식

상태 비보존형(Stateless) 자동설정 : 특정서버가 관리하지 않고 라우터에서 제공되는 상위64비트(Network Prefix)와 네트워크에 연결된 통신장비 등에 할당되는 인터페이스 주소 64비트(MAC Address 변환)를 합하여 128비트 주소를 생성. Windows 7 및 안드로이드 운영체제를 사용하는 단말에서는 하위 64비트에 대해서 사생활 보호를 위해 랜덤하게 생성하는 기능이 있음

위와 같은 방식으로 생성된 IPv6 주소를 표현하는 방법에는 다음과 같은 몇 가지 규칙이 있다.

- (1) IPv6 주소는 16비트 단위로 구분하며 각 단위는 16진수로 변환되어 콜론(:)으로 구분하여 표기

2001:0db8:80ad:0001:21e7:a764:eff1:de7c

- (2) 각 블록에서 앞에 있는 "0"들은 표시할 필요가 없음

2001:db8:80ad:1:21e7:a764:eff1:de7c

- (3) 0으로만 이뤄진 블록들은 "::"로 표시하여 생략할 수 있음

2001:db8:0:0:0:0:1 → 2001:db8::1

IPv6는 <표 2>와 같이 통신 방법에 따른 세 가지 주소체계를 갖는다.

표 2. IPv6 주소체계

주소체계	내용
Unicast	<ul style="list-style-type: none"> • 단일 인터페이스를 지정하며 보내진 패킷은 그 어드레스에 해당하는 인터페이스에 전달 (1:1) • Global, Link-local, Unique local, 기타 Unicast 주소로 구분됨
Multicast	<ul style="list-style-type: none"> • 여러 노드들에 속한 인터페이스의 집합을 지정하며 보내진 패킷은 그 어드레스에 해당하는 모든 인터페이스들에 전달. • 네트워크에 불필요한 트래픽을 유발하는 이유로 IPv4의 Broadcast 통신을 Multicast 통신으로 대체 (1:多) • 다양한 기능을 갖는 대신 복잡한 주소체계
Anycast	<ul style="list-style-type: none"> • IPv6에서 새롭게 정의된 주소체계 • 여러 노드들에 속한 인터페이스의 집합을 지정하며 보내진 패킷은 그 어드레스에 해당하는 인터페이스들 중 하나의 인터페이스에 전달됨 (1:1) • 부하의 분산에 유리하지만 아직까지 많이 활용되고 있지 않음

나. IPv6 헤더 형식

IPv6 패킷의 헤더(Header) 부분은 <그림 2>와 같이 IPv4 주소 헤더의 불필요한 필드를 제거함으로써 단순해진 헤더 포맷을 가지며 보다 빠른 처리가 가능해진다. IPv6의 헤더는 기본 헤더와 확장(Extension) 헤더로 나눌 수 있으며 <그림 2>는 기본 헤더를 나타내며, 기본 헤더 내 "Next Header" 필드에서 확장 헤더를 정의할 수 있다. 물론, IPv4에서도 헤더의 옵션 필드에 여러 가지 정보를 추가로 담을 있지만, 이로 인해 IPv4 헤더의 길이가 가변적으로 변하게 된다. 이는 라우팅 성능에 악영향을 줄 수 있는 원인이 될 수 있다. 하지만, IPv6에서는 기본 헤더는 20바이트로 고정이 되고 추가 정보를 포함할 경우 확장 헤더를 사용하기 때문에 기본 헤더 길이의 가변적인 문제는 발생하지 않게 된다.

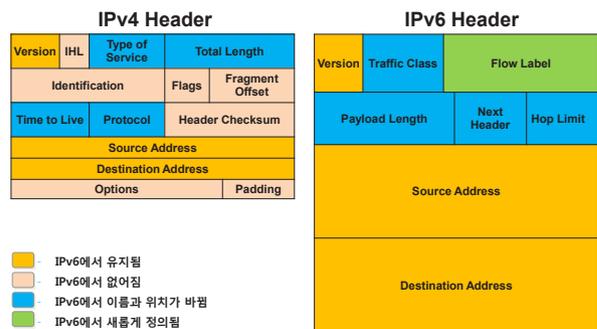


그림 2. IPv4 및 IPv6 헤더 비교

IPv6의 확장헤더는 Hop-by-Hop option, Destination option(Routing 헤더에서 지정된 장비에서 처리), Routing, Fragment, Authentication, Encapsulating security payload, Destination option(최종 목적지 확인), Upper-layer 헤더 8개로 구성이 된다. Destination option 헤더를 제외한 각 확장헤더는 IPv6 패킷에서 단 한번만 포함될 수 있으며, 2개 이상의 확장 헤더가 IPv6 기본 헤더 뒤에 연결 될 경우 위에서 나열한 순서대로 연결된다. <그림 3> IPv6 확장헤더 사용 예를 나타낸다.



그림 3. IPv6 확장헤더 예

Ⅲ. IPv6의 연착륙을 위한 기술

IPv4에서 IPv6로의 전환에 있어서 오랜 시간 공존할 수 밖에 없을 것이고, 이 때문에 전면적인 전환이 아닌 단계적이고 점진적인 전환이 현실적인 해법으로 고려되고 있다. 향후 수년간 두 주소체계의 공존이 불가피한 상황으로 효율적인 공존 방안 모색이 중요해짐에 따라 이미 2000년대 초부터 현재까지 다양한 형태로 연구 개발되어 온 IPv6 전환(Transition)기술이 당장 필요한 상황이 되었다[7]-[13].

1. 전환기술의 접근방식에 의한 분류

지난 15년 동안 개발된 전환기술을 기본적인 접근 방식으로 분류하자면 <그림 4>과 같이 듀얼스택(Dual-stack), 터널링(Tunneling), 주소변환(Translation)으로 나눌 수 있으며 각각의 주요 특징을 다음에서 설명한다.

가. 듀얼스택(Dual-stack)

듀얼스택은 전환 기술 중에서 가장 구현이 용이하며 하나의 네트워크 장비에서 IPv4와 IPv6 인터넷 주소체계를 동시에 지원하는 기술이다. 즉, 듀얼스택 기술을 지원하는 시스템은 물리적으로 하나의 시스템이지만 논리적으로 IPv4와 IPv6를 지원하는 두 개의 시스템이 있는 것처럼 생각할 수 있다. 듀얼스택은 하나의 시스템에서 두 기술을 모두 지원하기 때문에 두 주소를 모두 설정할 수 있다. 듀얼스택은 단말의 하드웨어 플랫폼과 상관없이 운영체제 내에서 소프트웨어 형태로 구현이 된다. IP 스택 아래는 동일하기 때문에 동일한 네트워크 카드를 사용하여 IPv4와 IPv6 통신을 모두 함께 한다. 듀얼스택의 가장 큰 장점은 IPv4와 IPv6가 가장 쉽게 호환성을 유지할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 기존의 IPv4 단일 프로토콜 환경에 비해 더 많은 네트워크 자원을 소모하므로 성능저하가 예상되며 관리상의 복잡도가 증대될 수 있다는 단점이 있다. 또한, 네트워크를 위한 유지와 관리 비용이 매우 높으며 네트워크 자체도 안정적이지 않다는 의견이 있다. 무엇보다, IP계층의 프로토콜 스택에 대한 수정이 이루어져야 하고 공인 IPv4 주소를 사용하기 때문에 주소 고갈 문제를 근본적으로 해결할 수 없다는 구조적인 단점이 있다.

나. 터널링(Tunneling)

IPv6 전환 초기에는 IPv4망이 IPv6망보다 더 많기 때문에 양 끝단에 IPv6 단말이 있고 중간 경로상에 IPv4망이 존재하는 경우가 많은 것이다. 이런 경우, 두 단말 사이에 있는 IPv4망에 논리적인 터널경로를 구성하여, IPv6 패킷을 IPv4 헤더로 감싸서(Encapsulation) IPv4망을 통과해 목적지 직전에 다

시 IPv4헤더를 벗겨내는(Decapsulation) 방식으로 양단간의 IPv6 통신을 가능하게 한다. 터널링 기법은 크게 설정 터널링(Configured Tunnel)기법과 자동 터널링(Automatic Tunnel)기법으로 나누어진다. 설정 터널링 기법은 통신을 수행하기 전에 터널 양 종단의 라우터 주소를 미리 알고 있어 라우터 종단간 터널을 설정하는 방식으로 IPv6 터널을 간단히 구성할 수 있으나 관리자가 일일이 IPv6 터널을 설정해야 하는 단점이 있으며 IPv4 주소와 관계없이 IPv6 터널을 생성할 수 있다. 이에 반해 자동 터널링 기법은 일련의 터널 생성 절차를 필요로 하지 않으며 통신 시 자동으로 터널이 생성된다는 장점이 있다. 단말의 IPv4 주소를 기반으로 단말-라우터, 단말-단말간 IPv6 터널을 형성하는 방법이다. 이는 복잡한 터널 설정 방법을 몰라도 IPv6 터널 형성을 위한 보통 라우터 TEP(Tunnel End Point, 보통 라우터)의 IPv4 주소와 간단한 설정 명령만 알면 IPv6 터널을 형성할 수 있다.

다. 주소변환(Address Translation)

주소변환 기술은 듀얼스택 및 터널링 기술과 함께 IPv6 전환기술의 기본이 되는 개념이며 IPv4 패킷과 IPv6 패킷을 상호 변환해주는 기술로 듀얼스택 및 터널링 적용이 어려운 경우 사용된다. IPv6 → IPv4 혹은 IPv4 → IPv6로 패킷을 완전히 재조합 하는 기술이다. IPv6와 IPv4 간의 주소 전환 장비를 이용하여, 기존의 IPv4에서 사용되던 NAT 기술과 마찬가지로 IPv6와 IPv4 간의 주소 테이블(Address Table)을 생성하여 양단간의 통신이 가능하도록 한다. IPv6 주소변환 장비의 기능은 단순히 근원지(Source)만을 변환하는 것이 아닌 목적지(Destination)까지 변환을 해야 하기 때문에 두 네트워크 사이의 매핑 정보가 있어야 통신이 가능하다. IPv6망은 IPv4에 대한 목적지를 전혀 알 수가 없으므로 매핑 정보를 형성하기 위해서는 IPv6에서 IPv4망으로 먼저 통신을 해야 한다. 매핑 정보가 생성된 후 IPv4망의 사용자들은 변환장비의 매핑 정보를 기반으로 IPv6망과의 통신을 할 수가 있다. 이러한 기술은 IPv4 패킷과 IPv6 패킷에서 IPv4 헤더와 IPv6 헤더를 제외한 상위 계층은 동일한 구조로 생성되어 있기 때문에 IPv4, IPv6 헤더 부분을 전환하며 그대로 데이터를 전송할 수 있게 한다. 다만, 상위 계층의 패킷에 IP 정보가 포함된 프로토콜이 포함된 경우에는 동작 과정이 더 복잡하고 제한적으로 동작할 수 있다.

2. 전환기술의 세대별 분류

<그림 4>과 같이 세 가지 접근방식으로 연구 개발되어 온 IPv6 전환기술들은 연구 시기를 기준으로 '1세대'와 '2세대'로 나누어 분류할 수 있다. 1세대는 IPv6 기본 기술과 관련 기술의

연구 개발이 본격적으로 진행되었던 1990년대 후반부터 2000년대 초반이라고 할 수 있다. 이 무렵 국내외적으로 가까운 미래에 IPv4 주소 고갈의 문제점이 대두 되면서 미국은 물론 일본, 한국 등 인터넷 주소 사용량의 폭발적 증가가 예상되는 국가들 중심으로 연구 개발이 활발히 진행되었던 시기라 할 수 있다. 하지만, IPv6 관련 기술의 본격적인 연구 개발에도 불구하고, NAT, 미사용 주소 재활당 등 임시방편이기는 하지만 주소 고갈의 해결책이 존재한 이유로 기대 만큼 IPv6의 도입이 빠르게 진행되지 않았고, 연구 개발 역시 소강 상태에 이르게 되었다. 특히, 서비스 사업자 측면에서 IPv6 도입으로 인해 수익 창출이 불확실한 상황에서 인프라 구축에 미온적일 수 밖에 없었고, 이 역시 IPv6 도입이 늦춰지는 하나의 이유가 되었다. 하지만, 2010년대 전후로 유·무선 통합 서비스 제공, 스마트 기기 보급 확산 등에 따른 무선 인터넷 서비스 활성화로 전 세계적

로 IP 주소 수요는 급격하게 증가하였고, 이와 맞물려 ICANN은 물론 APNIC이 주소 고갈을 선언하면서 IPv6 도입에 대한 필요성이 다시금 대두되게 되었다. 이 시기에 연구된 기술들을 2세대로 분류할 수 있다. 즉, 1세대에서 연구 개발된 세 가지 접근 방식 기반의 기술들을 개선하고자 최근 연구 개발된 기술을 2세대 IPv6 전환 기술이라 할 수 있다.

1세대 전환기술은 모두 IETF 내 NGTRANS WG 및 V6OPS WG에서 개발되었지만, 2세대 전환기술은 기본 기술에 따라 IETF내 서로 다른 WG에서 개발되었다. 듀얼스택 및 터널링을 기반으로 하는 전환기술들은 SOFTWARE WG에서 다루었으며, 주소변환을 기반으로 하는 전환기술들은 BEHAVE WG에서 다루었다. 반면, V6OPS WG에서는 운용관련 표준을 중심으로 다루면서 IPv6-Only 관점에서의 전환기술을 다루고 있다.

IV. 모바일 환경을 위한 IPv6 이동성 기술

다양한 무선 액세스 네트워크 환경에서 네트워크 계층(Network Layer, L3)에서의 수평적(Horizontal) 혹은 수직적(Vertical) 핸드오버를 위한 IPv6 이동성 관리 기법은 이동단말(Mobile Node, MN)의 이동 시 기존에 연결하고 있던 서비스의 연결성을 유지해주기 위한 것으로서, 가장 핵심적인 역할은 MN의 IPv6주소를 위치에 따라 바꾸지 않고 유지시키는 것이다. IPv6 이동성 기법은 MN의 이동성을 관리 관리하는 앵커의 위치에 따라 중앙 집중형 이동성 관리기반[14]-[19]과 분산형 이동성 관리기반[20]-[23]으로 나뉜다.

1. 중앙 집중형 이동성 관리 기반 기술

중앙 집중형 이동성 관리 기법은 MN의 위치 추적 및 주소 관리를 위한 이동성 앵커의 역할이 중요한데, 단말이 어느 곳으로 이동하더라도 이동성 앵커가 이를 관리하고 MN의 트래픽이 모두 이동성 앵커를 지나가도록 한다. 중앙 집중형 이동성 관리 기법은 동작 주체에 따라 MN의 이동 시에 이동성 관리 앵커가 MN의 위치를 추적하여 MN과 직접 IP 터널을 생성하는 호스트 기반(Host-based) 기법과 MN이 접속한 곳의 이동성 라우터와 IP 터널을 생성하는 네트워크 기반(Network-based) 기법으로 나뉘어진다[14]-[19].

가. 호스트 기반 IPv6 이동성 기술

대표적인 호스트 기반 IP 이동성 기술은 IETF에서 개발된 Mobile IPv6(MIPv6) 프로토콜이다. MIPv6에서 MN은 홈 네트워크에서 다른 네트워크로 이동할 때 세션을 유지하기 위해

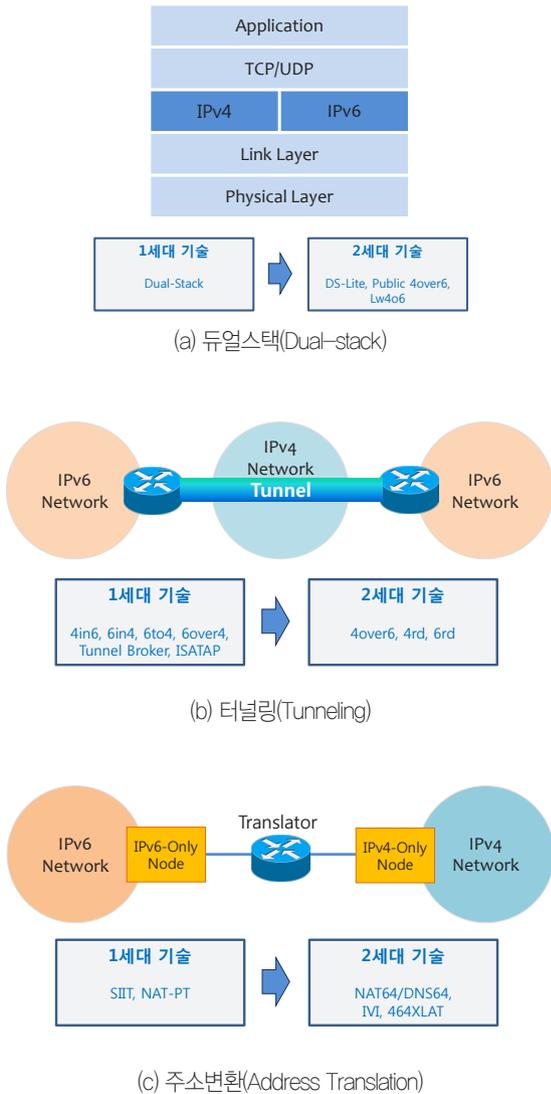


그림 4. IPv6 전환기술의 접근방식 및 세대별 분류

서 홈 네트워크에 위치하는 Home Agent와의 시그널링을 홈 주소(Home Address, HoA)와 임시주소(Care-of Address, CoA)간의 바인딩을 생성 및 유지하는 일을 수행하며 전반적인 이동성 관리를 제어한다.

하지만, MIPv6는 실제 적용 시 두 가지 문제점이 제기 되었다. 첫 번째는, 핸드오버 시 새로운 CoA 주소를 생성하고 이에 대한 등록이 완료되기 전까지 이동 검출(Movement detection), IP 주소 구성(IP address configuration), 위치 갱신(Location update)과 같은 필연적인 지연 요소를 가지게 된다. 이러한 지연들이 결합된 총 지연(Latency)은 실시간 응용이나 손실에 민감한 응용에서 수용되지 못할 정도의 큰 지연이 될 수도 있다. 다시 말해서, MIPv6는 일반적이고 거시적인 이동성만 지원하기 때문에 이 프로토콜만으로는 실제 제한된 무선영역의 이동통신망에서 MN의 빈번한 이동과 실시간성 서비스 응용을 지원하기에는 역 부족이다. 두 번째는, MN이 네트워크를 이동하여 변경하는 경우 항상 홈 네트워크에 있는 HA와 바인딩 과정을 수행해야 하며, 실제 통신을 수행하는 상대 노드(Correspondent Node, CN)에 대해서도 바인딩을 수행하여야 한다. 만일 MN이 홈 네트워크에서 먼 거리에 위치한 경우 이러한 등록 방식은 긴 등록 시간을 유발하며 네트워크에 불필요한 트래픽을 유발시킨다.

첫 번째 문제점을 해결하기 위해, 링크계층(L2) 핸드오버 사전 정보를 이용하여 L2 핸드오버 완료 이전에 네트워크계층 핸드오버를 미리 수행하는 고속 핸드오버 접근 방식이 IETF에서 고속 핸드오버 MIPv6(Fast Handover MIPv6, FMIPv6)란 이름으로 제안되었다. FMIPv6의 기본 개념은 L3 핸드오버 지연을 줄이기 위한 기술로서 새로운 링크 검출 시 즉각적인 데이터 송신을 가능케 하며 새로운 링크에 부착되는 즉시 MN으로 패킷이 전달될 수 있도록 하는 것을 목표로 한다.

두 번째 문제점을 해결하기 위해서, 지역적인 이동성 처리를 통해 등록 시간과 시그널링을 줄이는 지역 이동성 관리 접근 방식이 IETF에서 계층적 MIPv6(Hierarchical MIPv6, HMIPv6)이란 이름으로 제안되었다. HMIPv6의 기본 개념은 각 지역 도메인이 지역 이동성 에이전트를 가지며 지역 내의 이동성은 지역 이동성 에이전트가 처리하게 함으로써 HA나 CN에 MN의 지역적인 이동성을 숨기는 것이다. 아울러, HMIPv6의 핸드오버 지연을 줄이기 위해 FMIPv6와 결합된 고속 핸드오버 HMIPv6(Fast Handover HMIPv6, FHMIPv6)가 연구되었다.

나. 네트워크 기반 IPv6 이동성 기술

네트워크 기반 IPv6 이동성 기술은 호스트 기반 이동성 기술의 근본적인 문제점이 이슈화가 되면서 논의되기 시작하였다. 먼저, 성능 및 자원이 한정되어 있는 MN에서 복잡한 표준

MIPv6 프로토콜을 구현함으로써 MN의 전력 사용량 증가, 핸드오버 과정에서 다양한 시그널링 트래픽으로 인한 무선 구간에서의 자원 사용량 증가 등 실제적인 문제가 이슈화 되었다. 아울러, 비록 표준 기술이기는 하지만 현재 사용되고 있는 모든 MN이 MIPv6 기능을 갖추고 있다고 볼 수는 없으므로, MIPv6 기능을 갖추고 있지 않은 MN이 네트워크를 이동할 때 핸드오버가 불가능하다는 문제가 이슈화 되었다.

PMIPv6 기법은 MIPv6 프로토콜의 탑재 유무에 관계없이 모든 호스트들을 위한 IP 이동성을 지원하기 위해서 최근 IETF에서 표준화되었다. PMIPv6 프로토콜에서는, 이동성 관리에 MN이 관여하지 않는 상황에서 MN에게 이동성을 통한 IPv6 세션 연속성을 제공한다. 액세스 라우터와 유사한 역할을 수행하는 Mobile Access Gateway(MAG)가 MN을 대신해서 홈 에이전트와 유사한 역할을 수행하는 Local Mobility Anchor(LMA)와 핸드오버 관련 시그널링 메시지를 교환함으로써 이동성 관리를 수행한다. PMIPv6기법에서는, 성능 및 자원이 한정되어 있는 MN에 IP 이동성 프로토콜을 탑재할 필요가 없기 때문에, MN의 전력 사용량 증가, 핸드오버 과정에서 다양한 시그널링 트래픽으로 인한 무선 구간에서의 자원 사용량 증가 등 실제적인 문제가 발생되지 않는다. 아울러, IP 이동성 기능을 갖추고 있지 않은 어떠한 종류의 MN이더라도 네트워크를 이동할 때 핸드오버가 가능해진다. 따라서, 여러 가지 측면에서 고려할 때, 기본 MIPv6보다는 PMIPv6가 무선 액세스 네트워크 환경에서 실용적인 IP 이동성 솔루션이 될 것으로 예상하고 있다.

하지만, 기본 PMIPv6 프로토콜에서 역시 MN은 기존 네트워크와 새로운 네트워크에 존재하는 두 MAG 사이를 이동할 때 기존 MAG(Previous MAG, PMAG)와의 연결을 끊는 과정과 새로운 MAG(New MAG, NMAG)와의 연결 과정과 같은 일련의 핸드오버 과정이 필요하기 때문에 이로 인한 핸드오버 지연을 피할 수 없다. 이러한 핸드오버 지연을 줄이기 위해서 고속 핸드오버 PMIPv6(Fast Handover PMIPv6, FPMIPv6)가 연구개발 되었다.

중앙 집중형 이동성 관리 기반의 IPv6 이동성 표준 기술을 <표 3>에 나타낸다.

표 3. IPv6 이동성 기술 분류

기본	개념	기술
중앙 집중형	호스트 기반	MIPv6 (Mobile IPv6)
		FMIPv6 (Fast Handover MIPv6)
		HMIPv6 (Hierarchical MIPv6)
		FHMIPv6 (Fast Handover MIPv6)
	네트워크 기반	PMIPv6 (Proxy MIPv6)
		FPMIPv6 (Fast Handover PMIPv6)
분산형	DMM (Distributed Mobility Management)	

2. 분산형 이동성 관리 기반 기술

중앙 집중형 이동성 관리 기법은 현재의 모바일 네트워크와 같은 계층적 구조에 적용하기 쉬우며, MN의 위치와 트래픽에 대한 처리가 한 곳에서 이루어지기 때문에 관리가 효율적인 장점이 있지만 다음과 같은 몇 가지 문제점을 드러내고 있다. 첫째로, 중앙 집중형 이동성 관리기법에서의 이동성 앵커의 장에는 네트워크 전체적으로 치명적인 문제를 야기한다. 호스트 기반 IPv6 이동성 기술의 경우 같은 HA에 접속하고 있는 모든 MN 대한 연결이 중단 될 뿐만 아니라, 네트워크 기반 IPv6 이동성 기술의 경우에는 전체 네트워크의 통신 장애가 발생할 수 있는 위험을 가지고 있다. 두 번째로, 네트워크의 확장성에 취약하다. 급증하는 MN에 대해서 이를 처리하는 이동성 앵커가 하나이기 때문에, MN이 증가하고 MN들에 대한 이동성 지원 시그널링 메시지 및 단말의 트래픽의 전달을 위한 처리의 수가 급증하면 단일 앵커에 부하가 걸릴 수 있다. 마지막으로, 경로의 최적화가 이루어지지 않는 문제점이 있다. MN이 이동한 지점이 실제 데이터를 주고받는 지점과 더 가깝더라도, 기존 중앙 집중형 이동성 관리 기법에서는 중앙의 이동성 앵커를 거쳐 트래픽이 전달되어야하기 때문에 경로가 최적화 될 수 없다는 한계가 있다. 이 외에도 MN이 이동하지 않는 경우라도 이동성 지원을 위한 과정을 수행함으로써 발생하는 시그널링의 부하문제 등의 여러 단점들이 존재한다.

이러한 문제들을 해결하기 위해서 분산형 이동성 관리(Distributed Mobility Management, DMM) 기법에 관한 연구가 진행되고 있다[20]~[23]. 분산형 이동성 관리 기법의 주요한 특징은 단일 이동성 앵커를 없애고, 기존의 단일 앵커가 담당하던 기능들을 네트워크의 여러 곳에 분산하여 여러 이동성 앵커들이 독립적으로 자신의 구역에 접속한 MN들의 이동성 관리를 지원하도록 하는 것이다. 분산형 이동성 관리 기법에서 고려해야 할 주요 요구사항으로는 단일 이동성 앵커를 두지 않을 것, 세션에 따라 이동성을 처리할 수 있도록 할 것, 기존의 이동성 프로토콜의 확장을 우선적으로 고려할 것, 현재의 네트워크와 호환성을 고려할 것 등이 있다.

분산형 이동성 관리 기법의 구현 방향은 기존의 이동성 프로토콜을 확장하는 방식을 우선적으로 고려하였다. 이미 중앙 집중형 이동성 관리 기반의 IPv6 이동성 기술인 MIPv6, PMIPv6 프로토콜들이 있었기 때문에, 이러한 이동성 관리 기법들의 단일 앵커를 여러 곳으로 분산시키고자 하는 기법들이 중점적으로 연구되었다. 분산형 이동성 관리 기법에서 고려해야 하는 중요한 이슈 중에 하나는, MN의 정보를 어떻게 이동성 앵커 간에 공유할 수 있는가 하는 것이다. 중앙의 단일 앵커로부터 도메인 내

MN의 정보를 일괄적으로 관리하고 위치를 추적하던 중앙 집중형 관리 기법과는 달리, 분산형 구조에서는 이러한 기능들이 여러 앵커에 독립적으로 구현이 되어야 하기 때문에 MN이 접속했을 때 해당 MN이 새로 네트워크에 접속한 MN인지 다른 곳으로부터 이동한 MN인지를 파악해야 하는 절차가 필요하다.

V. IPv6 보안 기술

1. IPv6 에서 보안 기술의 필요성

IPv6의 여러 가지 장점에도 불구하고 IPv6를 실제 네트워크에 도입 및 구축하고 안전하게 운영하기 위해서는 보안상 해결해야 할 많은 문제점들이 존재한다. 왜냐하면, IPv6는 원래부터 보안기능들이 포함되어 있다 하더라도 IPv4와는 다른 방식으로 동작하는 새로운 프로토콜이고, 이는 예측 가능 또는 불가능한 다양한 보안상 위험요소가 존재함을 의미하기 때문이다. IPv6는 자동환경 설정, 이웃노드 탐색, Mobile IP 등의 기능이 추가되면서 기존 공격을 변형한 새로운 유형의 헤더조작, 바이러스, 웹 등의 공격이 발생할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 또한 IPv6 망으로의 완전한 전환 이전에 과도기적으로 IPv4와 IPv6의 병행 사용이 요구되어 단대단(End-to-End) 네트워크 보안이 곤란하다는 문제가 있다. 최근에는 홈 네트워크 장비 등 IPv6가 장착된 장비가 다양해지면서 인터넷 침해사고의 대상이 급격히 증가하고 있다[24]~[28].

2. IPv6 보안 기술의 현황 및 이슈 사항

이를 위해 IETF는 현재까지 다수의 IPv6 보안기술 관련 표준 규격을 개발하였으며 IPv6 전환기술, 라우팅 프로토콜, 로컬 네트워크, 이웃탐색 프로토콜, IP 터널링 등과 같이 IPv6 요소 기술들에 대한 보안이슈를 주로 다루고 있다. 따라서, IPv6 도입을 검토하고 있는 각급기관은 IPv6 구축 시에 해당 RFC 표준 규격들을 참고 및 적용함으로써 IPv6 운용 시에 발생할지도 모르는 보안상 위험 요소들을 미연에 방지할 필요가 있다. 또한, 미국의 국가표준기술원인 NIST(National Institute of Standards and Technology)는 2010년 12월에 Guidelines for the Secure Deployment of IPv6라는 IPv6의 도입 및 구축 시에 필요한 보안관련 이슈들을 다룬 표준안을 개발하여 공개하였다. 해당 표준안은 IPv4에서 IPv6로의 이행에 필요한 보안이슈 보다는 IPv6 자체의 구축 및 운영 시에 필요한 보안요소에 초점을 맞추고 있다.

하지만, 실제로 IPv6 보안을 적용할 경우 키 교환 알고리즘,

인증 알고리즘, 암호화 알고리즘 등 일련의 알고리즘들의 동작을 위한 패킷 트래픽, 계산 시간, 자원 소비, 스케줄링 구현 등으로 인해 데이터 지연 전송, 지연 지터, 패킷 손실, 서버의 서비스 지연 등 인터넷서비스 품질(QoS)에 영향을 줄 것으로 예상된다. 특히, 최근 모바일 환경에서의 멀티미디어 서비스가 주목을 받고 있는 상황에서, 핸드오버 단계에서 많은 보안 메커니즘 과정을 필요로 하는 IPv6 이동성 환경에서는 핸드오버 지연뿐만 아니라 보안 메커니즘 프로세싱까지 이중으로 QoS 측면에서 좋지 않은 영향을 미칠 것으로 예상된다. 게다가, 고품질·고음질 멀티미디어 전송의 경우, 낮은 자원을 갖는 임베디드 모바일 단말의 경우, 혹은 전송대역이 낮은 무선 통신의 경우 이러한 영향은 더 커질 것으로 예상된다.

VI. IoT에서의 IPv6 역할

1. IoT에서 IPv6의 필요성

세계 사물인터넷은 도입기 또는 성장 초기에 위치한 것으로 평가되며, 세계 사물인터넷 시장은 2022년까지 연평균 20% 성장하여 1조 2,000억 달러에 이를 것으로 전망된다. 세계 사물인터넷 시장은 네트워크, 단말기 등의 하드웨어, 특히 IoT 관련 서비스분야가 높은 성장세를 보이며 크게 확대될 것으로 예상된다. 많은 객체 간의 통신이 필요한 사물인터넷 환경에서 식별은 중요한 문제 중 하나이다. 무선으로 인터넷에 연결되는 장치들이 2013년 현재 1인당 1개 수준에서 2018년 1.5개로 증가할 것으로 전망되고 있으며, 단일 네트워크 수준을 포함하면 실제로 인터넷에 연결되는 객체의 수는 기하급수적으로 증가할 것으로 보인다. 이런 상황에서 객체의 식별정보로서 IPv6는 기존의 검증된 네트워크 통신 구조를 그대로 활용하면서 동시에 거의 무제한에 가까운 식별정보를 생성해낼 수 있기 때문에 사물인터넷의 필수조건으로 여겨지고 있다[29]~[33].

2. IoT에서 IPv6 적용 현황

IoT 통신을 전제로 한 데이터 전달 및 통신 제어 기술 개발이 활발하게 진행되고 있지는 않지만, 6lowpan, roll, core, lwig, 6tisch, 6lo와 같은 IETF 내 여러 WG에서 표준화 중인 센서 네트워크 상에서 IPv6 기반 통신 프로토콜을 적용 기술과 저속, 저전력 프로세서 플랫폼 상에서 통신 프로토콜 경량화 연구는 많이 진행되고 있다. IETF에서는 IoT 환경 구축에 필요한 기술을 코어 네트워크 기술보다 접속 네트워크 기술에 초점을 맞추고 있다고 볼 수 있다. 연구되는 IoT 관련 기술은 무선 자원 제

약적 노드(Wireless Resource Constrained Node)로 구성된 저전력 손실 네트워크(Low power and Lossy Network, LLN)를 사물인터넷 접속 네트워크 환경으로 인식하고 LLN 내에서 사용될 사물인터넷 표준기술을 중점적으로 다루고 있다. 사물인터넷 디바이스는 크기, 파워 및 컴퓨팅 능력에서 제약적 조건을 가지고 있기 때문에 이를 고려한 경량화된 프로토콜 표준기술에 관한 기술 개발을 고려 중이다. 이외에도, 향후 여러 통신사업자들과 센서 플랫폼 기반의 솔루션 개발 회사 등에서 IPv6 기반 저전력 IoT 통신을 위한 기술 개발이 활발히 이루어질 것으로 예상된다.

현재 각각 서비스 되고 있는 RFID, M2M, USN, 이동통신으로부터 얻어지는 정보를 상호 공유할 수 없는 상황이지만 IPv6를 다양한 통신방식과 단말을 매개하는 공통자원으로 활용해 IoT 발전을 기대할 수 있다. 아울러, IPv6의 IoT 기기 적용은 4세대 이동통신망(4G) 대비 10~1,000배의 연결 디바이스를 고려하고 있는 5세대 이동통신망(5G) 구축, 즉, 초연결 시대를 위한 핵심 요소로서 큰 의미가 있을 것이다.

VII. 국내외 IPv6 상용 서비스 사례

이미 서론에서 언급했듯이, Google, Facebook, AT&T, T-Mobile, COMCAST, Cisco 등과 같은 대표적 해외 인터넷 웹사이트, 서비스 사업자 및 라우터 장비 제조업체는 “World IPv6 Launch”를 선포하면서 IPv6상용 서비스를 본격 추진하고 있다. 국내의 경우, 미래창조과학부가 IPv6 확산에 2017년까지 274억원 투입할 계획을 발표했으며, 2017년까지 주요 포털에서 IPv6 적용을 마무리하고 2022년까지 중소 인터넷서비스사업자(ISP), 콘텐츠사업자(CSP) 그리고 공공기관에서 80~100% 도입률 달성 계획을 목표로 하고 있다. 본 절에서는 국내외에서 이루어진 IPv6 상용 서비스를 SKT와 T-Mobile의 사례를 들어 간략하게 소개한다.

1. SKT의 LTE 및 IoT 연동 IPv6 서비스 사례

SKT는 지난 2014년 9월 미래창조과학부와 한국인터넷진흥원 주도아래 삼성전자, 다음커뮤니케이션과 함께 IPv6기반의 LTE 상용서비스를 개시를 발표하였다[34]. SKT가 IPv6 무선망을 별도로 구축하고, 삼성전자는 IPv6 단말기(SKTEL 출시 갤럭시노트4)를 출시하였으며, 다음은 IPv6 기반 모바일 웹사이트를 개설해 KISA의 IPv6 연동망(6NGIX)를 통해 서비스를 제공하였다. SKT의 LTE 기반 IPv6 상용서비스 개시를 통해 그동안 구축해온 IPv6 인프라가 서비스로 연결되도록 추진하는

중요한 계기가 되었으며, 이를 통해 IPv6 서비스가 확산되어 하위권에 머물고 있는 국내 IPv6 이용률이 조만간 국제적으로 앞서갈 수 있을 것으로 기대하였다.

또한, 같은 해 11월 열린 사물인터넷 진흥주간(IoT Week)에 인프라 영역에서 IoT 서비스를 구현하는 개방형 플랫폼 ‘모비우스’와 IoT 전용망 구축을 위한 네트워크 가상화 기술, IPv6의 국내 첫 IoT 기기 시험 적용 등을 소개하였다. 이러한 IPv6의 IoT 기기 적용은 5G 구축을 위한 핵심 요소로 큰 의미가 있었으며 IoT 디바이스인 LTE 라우터에 IPv6를 시험 적용하는데 성공함으로써 IoT 확산에 중요한 전기를 마련했다는 평가를 받았다.

2. T-Mobile의 IPv6 전환기술 서비스 사례

미국의 ISP 업체인 T-Mobile은 대표적인 주소변환 기반의 IPv6 전환기술이었던 NAT64/DNS64 의 문제점을 해결하고 IPv6 네트워크에서 준수한 IPv4 연결성을 제공하는 464XLAT 아키텍처를 제안하여 2013년 4월 IETF에서 표준화 작업을 완료하고, 해당 기술을 사용하여 세계 최초로 IPv6 상용서비스를 개시하였다.

기존 NAT64/DNS64를 이용한 IPv6 네트워크는 많은 응용 프로그램이나 서비스의 정상 동작을 보장하지 못했다. 그 중 한 예로, IPv4 기반의 응용프로그램 개발 시 프로그램에서 통신할 서버 등의 목적지 주소를 도메인 이름이 아니라 IPv4 주소로 코딩하는 경우가 대표적으로 문제시 되었는데, 이 경우 응용프로그램에서 통신을 위해 DNS에 질의하지 않기 때문에 NAT64 등의 IPv4-IPv6 변환 프로세스가 진행되지 않아 IPv6 네트워크를 통한 IPv4 노드 간 통신이 불가능하게 된다. 이러한 문제를 해결한 464XLAT기술은 기존 상태 비보존형 및 상태 보존형 NAT64을 표준 변환기술을 조합하여 동작되는 전환기술이다.

T-Mobile은 자사의 LTE 네트워크에 IPv6을 적용하기 위하여 464XLAT 기술을 이용하고 있다. T-Mobile은 아이폰을 제외한 삼성 갤럭시S5 등 안드로이드 4.3 이후 출시 단말에 대해 CLAT 데몬을 탑재하여 IPv6 네트워크를 통해 서비스되도록 구성하였고, 전체 가입자 중 약 16%인 1천여만 명이 IPv6로 모바일 서비스를 이용하고 있다[13].

VIII. 결론

본 튜토리얼 논문에서는 IPv6의 기본 개념과 관련 기술을 이해시키고자 여러 가지 측면에서 알기 쉽게 설명하였다. 첫 번째로, 현재 사용되고 있는 IPv4와의 특징 비교와 주소 및 헤더를 통해 IPv6의 기본 개념을 자세하게 설명하였다. 두 번째로,

IPv6의 연락처를 위해 필요한 다양한 전환기술을 접근 방식과 세대별 분류를 통해 설명하였다. 세 번째로, 다양한 무선 환경에서의 이동단말의 연속적인 인터넷 서비스를 위한 IPv6 이동성 기술을 중앙 집중형 및 분산형 관리 기반으로 나누어 소개하였다. 네 번째로, IPv6 보안측면에서의 이슈를 다루었으며, 다섯 번째로, 최근 5G 네트워크 환경에서 중요한 서비스로 간주되고 있는 사물인터넷 서비스에서의 IPv6의 역할을 다루었다. 마지막으로, 국내외에서 진행된 대표적인 IPv6 상용서비스를 SKT와 T-Mobile의 사례를 들어 제시하였다.

Acknowledgement

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 ICT융합고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2014-H0401-14-1003).

참고 문헌

- [1] W. Stallings, “IPv6: The New Internet Protocol”, IEEE Communication Magazine, Vol. 34, No. 7, pp. 96~108, 1996.
- [2] A. Vallejo, J. Ruiz, J. Abella, A. Zaballos, and J.M. Selga, “State of the Art of IPv6 Conformance and Interoperability Testing”, IEEE Communication Magazine, Vol. 45, No. 10, pp. 140~146, 1996.
- [3] P. Roberts and M. Ford, “World IPv6 Launch: The Future is Forever”, IETF Journal, Vol.8, No. 1, pp. 12, 2012.
- [4] T. Tsou, D. R. Lopez, J. J. Brzozowski, C. Popoviciu, C. Perkins, and D. Cheng, Exploring IPv6 Deployment in the Enterprise: Experiences of the IT Department of Futurewei Technologies, IETF Journal, Vol.8, No. 1, pp. 13~17, 2012.
- [5] 박수홍, “미래인터넷과 IPv6”, 정보과학회지, 제31권, 제9호, pp. 34~40, 2013.
- [6] 고득녕, 김종민, IPv6 네트워크의 이해, 성안당, 2014.
- [7] M. Bagnul, A. Garcia-Martinez, and I. Van Beijnum, “The NAT64/DNS64 Tool Suite for IPv6 Transition”, IEEE Communications Magazine, Vol. 50, No. 7, pp.

- 177~183, 2012.
- [8] P. Wu, Y. Cui, J. Wu, J. Liu, and C. Metz, "Transition from IPv4 to IPv6: A State-of-the-Art Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 15, No. 3, pp. 1407~1424, 2013.
- [9] 김평수, "IPv4/IPv6 전환 기술 비교 분석", *Telecommunication Review*, SK Telecom, Vol. 24, No. 3, pp. 419~432, 2014.
- [10] 김평수, "IPv4/IPv6 공존 환경에서 운용(Operation) 및 전환(Transition) 기술의 표준화 동향", *한국통신학회지, 정보와 통신 특집호, 제31권, 제9호*, pp. 17~23, 2014.
- [11] M. Georgescu, H. Hazeyama, Y. Kadobayashi, and S. Yamaguchi, "Empirical Analysis of IPv6 Transition Technologies Using the IPv6 Network Evaluation Testbed", *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, Vol. 137, pp. 216~228, 2014.
- [12] N. Skoberne, O. Maennel, I. Phillips, R. Bush, J. Zorz, and M. Ciglaric, "IPv4 Address Sharing Mechanism Classification and Tradeoff Analysis", *IEEE/ACM Trans. Netw.*, Vol. 22, No. 2, pp.391~404, 2014.
- [13] 유지영, 임준형, "IPv6 상용서비스를 위한 464XLAT 기술 동향", *TTA Journal*, 한국정보통신기술협회, Vol. 155, pp. 107~111, 2014년 9월.
- [14] 김평수, 김용진 "Seamless 인터넷 서비스를 위한 IP 이동성 및 고속 핸드오버 기법", *한국통신학회지, 정보와 통신 특집호, 제26권, 제2호*, pp.9~15, 2009.
- [15] 김평수 "다양한 IP 이동성 고속 핸드오버 기법 분석 및 새로운 고속 핸드오버 Proxy Mobile IPv6 기법 제안", *한국 IT서비스학회지, 제8권, 제1호*, pp. 165~177, 2009.
- [16] S. Wang, Y. Cui, S.K. Das, W. Li, and J. Wu, "Mobility in IPv6: Whether and How to Hierarchize the Network?", *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 22, No. 10, pp. 1722~1729, 2011.
- [17] L. J. Zhang and S. Pierre, "Mobility Support for IPv6-based Next Generation Wireless Networks: A Survey of Related Protocols", *International Journal of Wireless Networks and Broadband Technologies*, Vol. 2, No. 3, pp. 18~41, 2012.
- [18] J.-H Lee, J.-M. Bonnin, I. You, and T.-M. Chung, "Comparative Handover Performance Analysis of IPv6 Mobility Management Protocols", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 3, pp. 1077~1088, 2013.
- [19] P. S. Kim, "An Optimized Vertical Inter-MAP Handover Scheme for HMIPv6 in Heterogeneous Wireless Network", *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, Vol. 9, No. 9, pp. 3599~3610, 2013.
- [20] J.-H. Lee, J.-M. Bonnin, P. Seite, and H.A. Chan, "Distributed IP Mobility Management from the Perspective of the IETF: Motivations, Requirements, Approaches, Comparison, and Challenges", *IEEE Wireless Communications*, Vol. 20, No. 5, pp. 159~168, 2013.
- [21] J. C. Zuniga, C. J. Bernardos, A. De La Oliva, T. Melia, R. Costa, A. Reznik, "Distributed Mobility Management: A Standards Landscape", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 51, No. 3, pp. 80~87, 2013.
- [22] J.-H. Lee, K. D. Singh, J.-M. Bonnin, and S. Pack, "Data Offloading: A Host-Based Distributed Mobility Management Approach", *IEEE Internet Computing*, Vol. 18, No. 1, pp. 20~29, 2014.
- [23] F. Giust, L. Cominardi, C. J. Bernardos, "Distributed Mobility Management for Future 5G Networks: Overview and Analysis of Existing Approaches", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 53, No.1, pp. 142~149, 2015
- [24] S. Frankel, D. Green, "Internet Protocol Version 6", *IEEE Security & Privacy*, Vol.6, No. 3, pp. 83~86, 2018.
- [25] 송중석, 이행근, 박학수 "IPv6 보안기술 국제표준화 동향", *정보보호학회지, 제22권, 제2호*, pp. 23~29, 2012.
- [26] Q. Li, C. Larsen, and T. van der Horst, "IPv6: A Catalyst and Evasion Tool for Botnets and Malware Delivery Networks", *Computer*, Vol. 46, No. 5, pp. 76~82, 2013.
- [27] C. E. Caicedo, J. B. D. Joshi, and S. R. Tuladhar, "IPv6 Security Challenges", *Computer*, Vol. 42, No. 2, pp. 36~42, 2009.
- [28] H. Rafiee, M. von Lowis, and C. Meinel, "IPv6 Deployment and Spam Challenges", *IEEE Internet*

- Computing, Vol. 16, No. 6, pp. 22~29, 2012.
- [29] A. Sehgal, V. Perelman, S. Kuryla, and J. Schonwalder, "Management of Resource Constrained Devices in the Internet of Things", IEEE Communications Magazine, Vol. 50, No. 12, pp. 144~149, 2012
- [30] T. Savolainen, J. Soininen, and B. Silverajan, "IPv6 Addressing Strategies for IoT", IEEE Sensors Journal, Vol. 13, No. 10, pp. 3511~3519, 2013.
- [31] M.R. Palattella, N. Accettura, X. Vilajosana, T. Watteyne, L.A. Grieco, G. Boggia, and M. Dohler, "Standardized Protocol Stack for the Internet of (Important) Things", IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 15, No. 3, pp. 1389~1406, 2013
- [32] A. J. Jara, L. Ladid, and A Skarmeta, "The Internet of Everything through IPv6: An Analysis of Challenges, Solutions and Opportunities", Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications (JoWUA), Vol. 4, No. 3, pp. 97~118, 2013.
- [33] 성기훈, IPv6 기반 Internet of Things(사물인터넷) 기술 동향, 한국인터넷진흥원, 2014.
- [34] 김평수, 5G 네트워크에서의 IPv6, OSIA Annual Technology Assembly Workshop, 2014년 11월.

약 력



김 평 수

1994년 인하대학교 전기공학과 공학사
 1996년 서울대학교 제어계측공학과 공학석사
 2001년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 공학박사
 2001년~2005년 삼성전자 디지털미디어연구소 책임연구원
 2005년~현재 한국산업기술대학교 전자공학부 부교수
 2012년~2013년 University of California, Irvine, CECS, Visiting Scholar
 2014년~현재 IETF 미리 포럼 간사
 관심분야: 차세대 유무선 네트워크, IPv6 운용 및 전환 기술, 미래인터넷 및 IoT 네이밍, 시스템 소프트웨어 솔루션, 최적 추정 필터링 등