



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사학위논문

모바일 기기를 위한 에너지 효율적인 무선 네트워크
인터페이스 선택 기법

Energy-Efficient Wireless Network Interface Selection for
Mobile Devices

2014년 2월

서울대학교 대학원
전기·컴퓨터 공학부
김 봉 재

공학박사학위논문

모바일 기기를 위한 에너지 효율적인 무선 네트워크
인터페이스 선택 기법

Energy-Efficient Wireless Network Interface Selection for
Mobile Devices

2014년 2월

서울대학교 대학원
전기·컴퓨터 공학부
김 봉 재

모바일 기기를 위한 에너지 효율적인 무선 네트워크
인터페이스 선택 기법
Energy-Efficient Wireless Network Interface Selection for
Mobile Devices

지도교수 조유근

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함
2013년 11월

서울대학교 대학원
전기·컴퓨터 공학부
김 봉 재

김봉재의 공학박사 학위논문을 인준함
2013년 12월

위 원 장	신	현	식	(인)
부위원장	조	유	근	(인)
위 원	민	상	렬	(인)
위 원	박	근	수	(인)
위 원	홍	지	만	(인)

초 록

최근 무선 통신 기술과 모바일 컴퓨팅 환경의 발전으로 스마트 폰이나 스마트 패드와 같이 Wi-Fi, 3G, LTE 네트워크 등을 동시에 지원하는 모바일 장치들이 다양한 분야에 널리 사용되고 있다. 대부분의 모바일 장치들은 제한된 배터리 용량을 갖고 있어 에너지의 효율성은 매우 중요한 요소이다. Wi-Fi, 3G, LTE와 같은 무선 통신 기법은 네트워크 서비스 범위, 통신 속도, 에너지 소모량과 같은 측면에서 매우 다른 특성을 보인다. 따라서 각 네트워크의 특성을 이용하여 모바일 장치의 에너지 및 데이터 전송 효율성을 증대시킬 수 있다.

본 논문에서는 3G와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스를 가지는 모바일 장치를 가정하여 네트워크 탐지 및 선택 주기에 따른 모바일 장치의 에너지 소모량과 데이터 전송 소요 시간을 모델링한다. 제안한 에너지 소모량 모델의 분석을 통해 에너지 소모량을 최소화할 수 있는 네트워크 탐지 및 선택 주기가 존재함을 보인다. 최적의 네트워크 탐지 및 선택 주기는 데이터 전송 요청량이나 Wi-Fi 네트워크의 가용성과 같은 다양한 네트워크 환경 요소에 따라 달라진다. 이를 기반으로 네트워크 탐지 및 선택 주기를 동적으로 조절할 수 있는 에너지 효율적인 네트워크 인터페이스 선택 기법 (*AWNIS, Adaptive Wireless Network Interface Selection*) 을 제안한다. 제안 기법은 제안한 에너지 소모 모델을 기반으로 Wi-Fi 네트워크 가용성을 근사화하여 에너지 및 데이터 전송 효율 측면에서 뛰어난 Wi-Fi 네트워크를 사용하기 위한 탐지 및 선택 주기를 동적으로 조절한다. 이를 통해 모바일 장치의 에너지 소모량과 데이터 전송 효율성을 높일 수 있다. 성능 비교 및 분석을 통해 제안 기법이 일정 수준의 데이터 전송 지연 시간을 보장하면서 모바일 장치의 에너지 소모를 감소시킬 수 있음을 보인다.

제안 기법은 3G와 Wi-Fi 네트워크의 특성과 유사한 앞으로 개발되거나 사용이 가능한 근거리와 원거리 네트워크 인터페이스를 동시에 가지는 모바일 장치의 네트워크 인터페이스 선택 기법에 적용이 가능하다.

주요어: 모바일 장치, 무선 네트워크 인터페이스, 네트워크 인터페이스 선택, 에너지 효율성

학번: 2008-20839

목 차

초 록	i
목 차	ii
표 목 차	v
그 림 목 차	vi
제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적 및 범위	3
1.3 연구 성과 요약	4
1.4 논문의 구성	4
제 2 장 관련 연구	6
2.1 TailEnder	6
2.2 CoolSpots	8
2.3 Context-For-Wireless	9
2.4 SALSA	11
2.5 기타 기법	12

제 3 장	에너지 효율적인 무선 네트워크 인터페이스 선택 기법 (AW-NIS)	13
3.1	무선 네트워크 인터페이스 선택 주기에 따른 비용 모델링	13
3.1.1	가정 사항	13
3.1.2	3G와 Wi-Fi를 이용한 데이터 전송	14
3.1.3	에너지 소모량 모델링	20
3.1.4	데이터 전송 소요 시간 모델링	25
3.2	무선 네트워크 인터페이스 선택 주기에 따른 비용 분석	29
3.2.1	에너지 소모량 분석	32
3.2.2	데이터 전송 지연 시간 분석	36
3.3	에너지 효율적인 무선 네트워크 인터페이스 선택 알고리즘	38
3.3.1	무선 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 단계	40
3.3.2	3G에서 Wi-Fi로의 네트워크 연결 전환 단계	41
3.3.3	Wi-Fi에서 3G로의 네트워크 연결 전환 단계	42
3.3.4	AWNIS의 동작의 예	43
3.4	에너지 효율적인 무선 네트워크 인터페이스 선택 알고리즘 분석	44
3.4.1	에너지 소모량 측면 분석	44
3.4.2	데이터 전송 지연 시간 측면 분석	45
제 4 장	성능 분석 및 비교	48
4.1	시뮬레이션 환경	48
4.2	성능 분석 및 비교에 사용된 네트워크 선택 기법	50
4.2.1	AWNIS의 적용이 가능한 네트워크 선택 기법	51
4.2.2	최적의 네트워크 선택 기법	53

4.2.3	비교 가능한 기존의 네트워크 선택 기법	54
4.3	시뮬레이션 결과 및 분석	54
4.3.1	α 에 따른 에너지 소모량 및 데이터 전송 지연 분석	54
4.3.2	합성 워크로드 (Synthetic Workloads)를 이용한 성능 분석	57
4.3.3	현실적인 워크로드 (Realistic Workloads)를 이용한 성능 분석	63
4.4	<i>AWNIS</i> 알고리즘 개선 및 성능 분석	67
4.4.1	개선된 <i>AWNIS</i> 알고리즘	67
4.4.2	개선된 <i>AWNIS</i> 의 성능 분석을 위한 시뮬레이션 환경	71
4.4.3	개선된 <i>AWNIS</i> 의 성능 분석 및 비교	71
제 5 장	결론 및 향후 연구	77
5.1	결론	77
5.2	향후 연구	78
참 고 문 헌		80
Abstract		86

표 목 차

2.1	<i>Context-For-Wireless</i> 의 데이터 전송 비용	10
3.1	주 네트워크와 부 네트워크의 특성	14
3.2	모델링에 사용된 기호와 그 의미 (1/2)	17
3.3	모델링에 사용된 기호와 그 의미 (2/2)	18
3.4	에너지 소모량 분석을 위한 파라미터와 그 설정 값	30
3.5	802.11b와 802.11g의 RSSI에 따른 데이터 전송 속도의 예	30
3.6	3G와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스의 실제 송신 및 수신 전력의 예	31
3.7	제안 기법의 설명을 위해 사용된 기호와 그 의미	39
4.1	시뮬레이션 파라미터(I)	51
4.2	<i>ECG</i> 워크로드에 의한 평균 데이터 전송 소요 시간 (AP의 수 = 15)	65
4.3	<i>RealisticTraffic</i> 워크로드에 의한 평균 에너지 소모량 및 데이터 전송 소요 시간 (AP의 수 = 15)	66
4.4	개선된 <i>AWNIS</i> 의 설명을 위해 사용된 추가 기호와 그 의미	68
4.5	시뮬레이션 파라미터(II)	72

그림 목 차

1.1	다중 무선 네트워크 인터페이스를 가지는 모바일 장치의 예	1
2.1	3G를 이용한 일반적인 데이터 전송의 예	6
2.2	3G를 이용한 <i>TailEnder</i> 의 데이터 전송의 예	7
2.3	<i>CoolSpots</i> 의 서비스 구조	8
2.4	네트워크 인터페이스 선택에 사용되는 <i>SALSA</i> 의 제어 선택 함수 (Control Decision Fuction)의 개념	11
3.1	3G 네트워크의 가용성의 예	15
3.2	Wi-Fi 네트워크의 가용성의 예	15
3.3	3G와 Wi-Fi를 이용한 데이터 전송의 예	16
3.4	Wi-Fi 네트워크의 상태 다이어그램 (State Diagram) 모델	16
3.5	주기적인 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 동작에 의한 3G와 Wi-Fi 네트워크 사용의 예	19
3.6	평균 데이터 전송 요청량(EAR)과 탐지 및 선택 주기 (δ_{NIS})에 따른 에너지 소모량 ($\lambda_{Wi-Fi} = \frac{1}{60}$, $\mu_{Wi-Fi} = \frac{1}{40}$)	32
3.7	λ_{Wi-Fi} , μ_{Wi-Fi} , δ_{NIS} 에 따른 에너지 소모량 ($EAR = 100KB/s$) . .	34
3.8	λ_{Wi-Fi} , μ_{Wi-Fi} , δ_{NIS} 에 따른 에너지 소모량 ($EAR = 100KB/s$) . .	35
3.9	데이터 전송 요청량에 따른 데이터 전송 소요 시간(I) ($E[T_{3G}] = 60$ 초, $E[T_{Wi-Fi}] = 40$ 초, $E[R_{3G}] = 0.1MB/초$, $E[R_{Wi-Fi}] = 1.0MB/초$) .	37
3.10	데이터 전송 요청량에 따른 데이터 전송 소요 시간(II) ($E[T_{3G}] =$ 80 초, $E[T_{Wi-Fi}] = 20$ 초, $E[R_{3G}] = 0.1MB/초$, $E[R_{Wi-Fi}] = 1.0MB/초$)	38

3.11 “3G Wi-Fi = 100 100” – “3G Wi-Fi = 50 50”의 네트워크 환경 변화의 예	45
3.12 α 에 따른 AWNIS의 에너지 소모량 ($EAR = 100KB/s$, $E[R_{3G}] = 0.1MB/초$, $E[R_{Wi-Fi}] = 1.0MB/초$)	46
3.13 α 에 따른 AWNIS의 데이터 전송 소요 시간 ($EAR = 100KB/s$, $E[R_{3G}] = 0.1MB/초$, $E[R_{Wi-Fi}] = 1.0MB/초$)	47
4.1 시뮬레이션을 위한 네트워크 환경의 예	49
4.2 제안한 AWNIS의 적용 예	50
4.3 3G와 Wi-Fi를 모두 이용하는 기법의 α 따른 에너지 소모량 (AP의 수 = 15, $EAR = 100 KB/s$)	55
4.4 Wi-Fi 만을 이용하는 기법의 α 따른 에너지 소모량 (AP의 수 = 15, $EAR = 100 KB/s$)	56
4.5 3G와 Wi-Fi를 모두 이용하는 기법의 α 따른 데이터 전송 소요 시간 (AP의 수 = 15)	57
4.6 Wi-Fi 만을 이용하는 기법의 α 따른 데이터 전송 소요 시간 (AP의 수 = 15)	58
4.7 평균 데이터 전송 요청량에 따른 에너지 소모량 (AP의 수 = 15, AWNIS를 사용하지 않는 기법의 $\delta_{NIS} = 30$ 초)	59
4.8 Wi-Fi 액세스 포인트 수의 변화에 따른 에너지 소모량 (평균 데이터 전송 요청량 = 100 KB/s, AWNIS를 사용하지 않는 기법의 $\delta_{NIS} = 30$ 초)	60
4.9 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기의 변화에 따른 에너지 소모량 (평균 데이터 전송 요청량 = 100 KB/s, AP의 수 = 15)	61
4.10 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 네트워크 인터페이스 선택 기법의 데이터 전송 소요 시간 (AP의 수 = 15)	62
4.11 Wi-Fi만을 사용하는 네트워크 인터페이스 선택 기법의 데이터 전송 소요 시간 (AP의 수 = 15)	63

4.12 ECG 워크로드에 의한 평균 에너지 소모량(AP의 수 = 15)	64
4.13 유효 데이터 전송 속도에 따른 단위 에너지 소모량 변화	68
4.14 Wi-Fi 액세스 포인트 수의 변화 따른 평균 에너지 소모량 (평균 데이터 전송 요청량 = 100 KB/s, 고정 주기 = 30 초)	73
4.15 Wi-Fi 액세스 포인트 수의 변화 따른 평균 데이터 전송 소요 시간 (고정 주기 = 30 초)	74
4.16 Wi-Fi 액세스 포인트의 성능 저하에 의한 평균 에너지 소모량 (AP의 수 = 15, 평균 데이터 전송 요청량 = 100 KB/s, 고정 주기 = 30 초)	75
4.17 Wi-Fi 액세스 포인트의 성능 저하에 의한 평균 데이터 전송 소요 시간 (AP의 수 = 15, 고정 주기 = 30 초)	76

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

최근 무선 통신 기술의 발전과 모바일 컴퓨팅 기술의 발전에 따라 3G, Wi-Fi, LTE와 같은 다양한 네트워크 통신 기술들을 하나의 모바일 장치에서 지원할 수 있는 스마트폰이나 스마트 패드와 같은 모바일 장치들이 널리 사용되고 있다. 그림 1.1은 다중 무선 네트워크 인터페이스를 가지는 모바일 장치의 예를 보여준다. 이런 모바일 장치를 이용하여 언제 어디서나 데이터 통신이 필요한 다양한 응용 서비스의 이용과 제공이 가능하게 되었다.



그림 1.1: 다중 무선 네트워크 인터페이스를 가지는 모바일 장치의 예

무선 통신 기술은 유선 통신 기술과 다르게 데이터 통신을 위한 통신 케이블과 같은 요소가 필요하지 않아 통신을 위한 인프라를 구축하는데 필요한 비용을 절감하는 효과가 매우 크다 [CH12, PVK10]. 이런 무선 네트워크 기술을 효율적으로 활용할 수 있는 다중 네트워크 인터페이스를 갖춘 모바일 장치는 일상 생활 뿐만 아니라 비즈니스, 의료, 교육을 넘어 전 산업 분야에 걸쳐 다양한 용도로 사용되고

있다 [HMRP+13, VSTB13, KA08, HLS11, PH12]. 공장과 같은 환경에서는 각종 기계 장치의 현재 동작 상황이나 오류 모니터링에 필요한 자료의 수집에 사용될 수 있으며 [DZYD13, WMW05, WKHW02], 의료 분야에서는 환자의 진료 및 진단 기록을 관리 서버로 바로 전송하여 관련 진료 정보들을 모바일 장치를 이용하여 필요 시점에 효율적으로 사용가능하다. 또한 교육 분야에서는 다양한 콘텐츠를 모바일 장치를 이용하여 학습자에게 제공할 수 있어 효과적인 교육이 가능하다. 하지만, 대부분의 모바일 장치는 배터리로 동작하고, 대부분의 모바일 장치는 제한적인 배터리 용량 (2000 mA - 4000 mA)을 갖고 있어 모바일 장치의 에너지 효율성은 매우 중요한 요소 중의 하나이다 [BMS12].

다중 무선 네트워크 인터페이스를 갖는 모바일 장치에서 데이터 통신을 위한 각각의 네트워크 통신 기법 및 해당 네트워크 인터페이스는 일반적으로 매우 다른 특성을 갖는다 [FVFM05]. 예를 들어 3G와 Wi-Fi는 데이터 전송 속도, 네트워크 범위, 에너지 소모량의 측면에서 비교할 때 매우 다른 특성을 갖는다 [VBH03]. 3G는 Wi-Fi에 비해 넓은 서비스 영역 (Network Coverage)을 가지고 있지만, 데이터 전송이나 수신에 더 많은 에너지를 소모한다 [GD10, VJ01, Cha03]. 일반적으로 Wi-Fi 액세스 포인트 (Access Point, AP)는 100 m - 200 m의 서비스 반경을 가지며, 데이터 전송시, 3G는 Wi-Fi에 비해 약 2배 정도 많은 에너지를 소모한다 [BBV09, WM10].

따라서 사용 가능한 네트워크 통신 기법이나 네트워크 인터페이스를 네트워크 환경에 따라 선택적으로 활용하여 모바일 장치의 에너지 효율성을 증대시킬 수 있다. 예를 들어, 3G와 Wi-Fi가 동시에 사용될 수 있는 네트워크 환경이라면, 데이터를 전송할 때 3G 대신 Wi-Fi를 이용하여 데이터를 전송하면 에너지 소비량을 줄일 수 있다. 또한 Wi-Fi가 3G와 비교할 때, 데이터 전송 속도가 더 빠르므로 데이터 전송 지연 시간도 효과적으로 줄일 수 있다.

에너지 제약적인 모바일 장치에서 데이터 통신에 사용되는 에너지 소모량을 줄여 에너지 효율성을 향상시키기 위해 다중 무선 인터페이스를 활용하거나 각각의 네트워크 통신 기법의 고유한 특성을 이용하는 다양한 관련 기법들이 제안되었다 [SSM09, SSMD10, PAGW06, RZ07, RPS+10, CXC11, TS09, DSP10, ZK07, KCH14]. 효율적인 무선 네트워크 인터페이스 관리 기법을 고안하기 위해서는, 모바일 기기가 지원하는 각각의 무선 통신 기법의 데이터 전송 속도, 신호 세기, 사용 가능한 무선 인터페이스의 종류와 같은 요소들을 필수적으로 고려하여야 한다. 하지만, 기존에 제안된 무선 네트워크 관리 기법에서는 네트워크 탐색 주기와 같은 요소를 포함한

중요한 고려 사항들이 동시에 고려되지 않았다. 다중 무선 네트워크 인터페이스를 갖는 모바일 장치에서 사용 가능한 무선 네트워크 인터페이스를 판단하고 사용하기 위해 네트워크 탐색 및 선택 동작을 수행한다. 이 수행 주기는 해당 네트워크의 가용성을 알아내기 위한 네트워크 탐색시 발생하는 에너지 소모량을 무시할 수 없어 매우 중요한 요소이다 [RZ07, RPS⁺10]. 또한 일반적인 네트워크 환경뿐만 아니라 공장과 같은 네트워크 환경에서는 공장의 기계장치에 의한 간섭과 감쇠 등이 발생하여 네트워크 환경이 상황에 따라 급격하게 변화하기 때문에 효율적인 무선 네트워크 인터페이스를 선택하기 위한 네트워크 탐색 및 선택 주기를 동적으로 조절할 필요가 있다 [WMW05].

본 논문에서는 에너지 제약적인 모바일 장치의 에너지 효율성을 향상시키기 위하여 네트워크 환경 변화에 따라 효율적인 무선 네트워크 인터페이스를 탐지 및 선택하는 주기를 동적으로 조절할 수 있는 에너지 효율적인 무선 네트워크 인터페이스 선택 기법을 제안한다.

1.2 연구 목적 및 범위

본 논문에서는 데이터 전송시 모바일 장치의 에너지 소모량을 줄여 모바일 장치의 에너지 효율성을 높이기 위한 *AWNIS* (Adaptive Wireless Network Interface Selection) 이라 부르는 에너지 효율적인 무선 네트워크 인터페이스 선택 기법을 제안한다. 제안 기법에서는 두 개의 특성이 서로 다른 근거리 및 원거리 무선 인터페이스 (3G와 Wi-Fi)를 갖는 모바일 장치를 가정한다. 변화하는 네트워크 환경을 고려하여 에너지 효율적인 무선 인터페이스를 사용하기 위해 사용 가능한 네트워크를 탐지하고 선택하는 주기에 따른 모바일 장치의 에너지 소모량을 분석한다. 또한 데이터 전송시 두 개의 네트워크 인터페이스를 사용하는 방법에 따른 데이터 전송 소요 시간을 모델링한다. 모델링된 에너지 소모량과 데이터 전송 소요 시간 모델의 분석 결과를 기반으로 에너지 효율적인 무선 네트워크 인터페이스 선택 기법을 제안한다. 또한 시뮬레이션을 통해 제안 기법이 데이터를 전송할 때 모바일 장치의 에너지 소모량을 줄이고 일정 수준의 데이터 전송 지연 시간을 보장할 수 있음을 보인다. 본 논문에서는 데이터 전송시 고려되는 무선 네트워크 인터페이스 사이의 호전환 (Handover)과 그 세부적인 방법에 대한 내용은 연구의 범위에 포함하지 않는다.

1.3 연구 성과 요약

본 논문에서는 서로 특성이 다른 근거리 및 원거리 무선 네트워크 인터페이스를 가지는 모바일 장치를 가정하고 네트워크 탐지 및 선택 주기에 따른 에너지 소모량과 데이터 전송시 네트워크 인터페이스를 사용하는 방법에 따른 데이터 전송 소요 시간을 모델링하였다.

모델링된 에너지 소모량 모델과 데이터 전송 소요 시간 모델을 이용하여 네트워크 탐지 및 선택 주기에 따른 에너지 소모량과 데이터 전송 지연 시간 측면의 비용 분석을 통해 데이터 전송시 모바일 장치의 에너지 소모량을 최소화 할 수 있는 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기가 존재함을 보였다.

에너지 소모량과 데이터 전송 지연 시간 측면의 비용 분석을 기반으로 모바일 장치에 적용 가능한 에너지 효율적인 무선 네트워크 인터페이스 선택 기법 (AWNIS, Adaptive Wireless Network Interface Selection) 을 제안하였다. 제안 기법은 에너지 효율적인 무선 인터페이스를 사용하기 위해 변화하는 네트워크 환경을 고려하여 주기적으로 네트워크 탐지 및 선택 동작을 수행한다. 또한 네트워크 탐지 및 선택 주기를 변화하는 네트워크 환경을 고려하여 동적으로 조절하여 네트워크 탐지 및 선택 비용을 최소화 한다.

제안 기법을 이용하면, 모바일 장치의 에너지 소모량을 줄일 수 있으며, 데이터 전송에 필요한 전송 시간을 감소시킬 수 있어 데이터 전송시 데이터 지연 시간을 줄일 수 있음을 보였다. 또한, 제안된 기법은 3G와 Wi-Fi 인터페이스 뿐만 아니라 LTE와 Wi-Fi와 같은 근거리 및 원거리 데이터 통신 기법에도 동일하게 확장하여 적용 가능하다.

1.4 논문의 구성

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 모바일 장치에서 사용되는 네트워크의 특성을 활용하거나 모바일 장치의 다중 무선 인터페이스를 활용하여 에너지 소모를 줄이는 기존의 다양한 기법들에 대해서 논의한다. 3장에서는 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기에 따른 모바일 장치의 에너지 소모량과 데이터 전송시 네트워크 인터페이스를 사용하는 방법에 따른 데이터 전송 소요 시간을 모델링하고 이를

기반으로 에너지 효율적인 무선 인터페이스 선택 기법을 제안한다. 4장에서는 선택 가능한 네트워크 인터페이스 선택 기법들과 기존의 네트워크 인터페이스 선택 기법들을 이용하여 제안된 기법의 성능을 에너지 소모량 측면과 데이터 전송 지연 시간 측면에서 비교 분석한다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

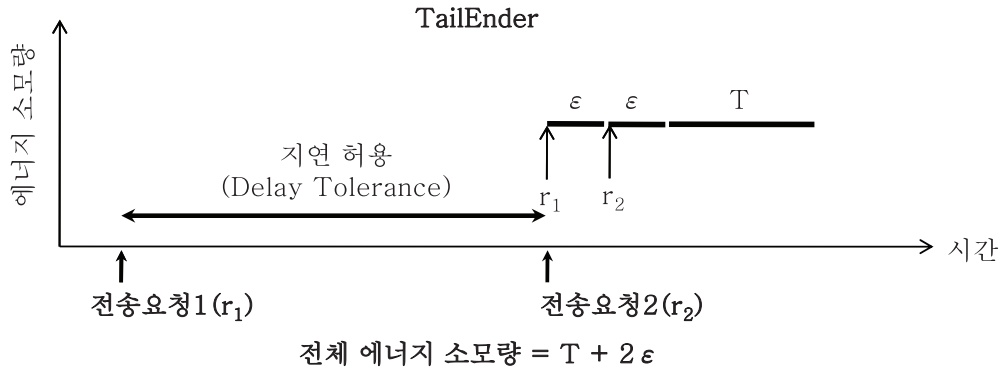


그림 2.2: 3G를 이용한 TailEnder의 데이터 전송의 예

테일 시간은 3G 네트워크 서비스를 제공하는 서비스 제공자에 의해 각각 다르게 설정 될 수 있다. 데이터를 전송 후 연결을 바로 종료하지 않고 높은 에너지 소비 상태를 유지하는 테일 시간의 에너지 소모량을 테일 에너지 소모량 (Tail Energy Consumption) 이라고 정의한다. TailEnder는 데이터 전송시 발생하는 이 테일 에너지 소모량을 최소화하는 기법이다.

그림 2.1은 3G를 이용한 일반적인 데이터 전송에 따른 에너지 소모량의 예를 보여주며, 그림 2.2는 3G를 이용한 TailEnder의 데이터 전송에 따른 에너지 소모량을 보여준다. 그림 2.1과 2.2에서 확인 할 수 있듯이 데이터 전송 요청은 총 두 번 발생하였다. 그림 2.1과 2.2에서 ϵ 는 데이터 전송에 소모되는 에너지 소모량을 의미하고, T 는 데이터 전송후 발생하는 테일 시간에서 발생하는 테일 에너지 소모량을 의미한다.

그림 2.2에서와 같이 TailEnder는 데이터 전송에서 각 데이터 전송 요청의 지연 허용 특성을 이용하여 데이터 전송 요청이 발생할 때 마다 데이터를 전송하는 것이 아니라 몇몇의 데이터 전송 요청을 한꺼번에 처리하여 테일 에너지 소모량을 줄인다. 따라서 그림 2.1과 그림 2.2를 비교하면, TailEnder를 이용하여 데이터를 전송하는 것이 한번의 테일 구간을 줄일 수 있어 해당 테일 구간에 대한 테일 에너지 소모량을 줄일 수 있다. 그림 2.1과 그림 2.2의 예에서의 일반적인 데이터 전송시와 TailEnder를 이용시의 에너지 소모량은 다음과 같이 계산될 수 있다.

- 일반적인 데이터 전송의 에너지 소모량 = $2 \times \epsilon + 2 \times T$

- *TailEnder* 사용시의 에너지 소모량 = $2 \times \varepsilon + T$

*TailEnder*는 이와 같은 방법으로 모바일 장치의 에너지 소모량을 줄일 수 있다. 따라서, 데이터 전송시 전송 지연 허용이 큰 응용에 적합하며, 그 예로는 메일 전송 및 수신과 관련한 응용들이 있다. 하지만 *TailEnder*는 데이터 전송시 3G 네트워크 인터페이스만을 이용하고, 3G 보다 에너지 효율적인 Wi-Fi 네트워크 인터페이스를 데이터 전송시 고려하지 않으므로 Wi-Fi 네트워크 인터페이스를 이용하면 기존의 *TailEnder* 기법보다 에너지 소모량 측면의 성능을 좀 더 향상시킬 수 있다.

2.2 CoolSpots

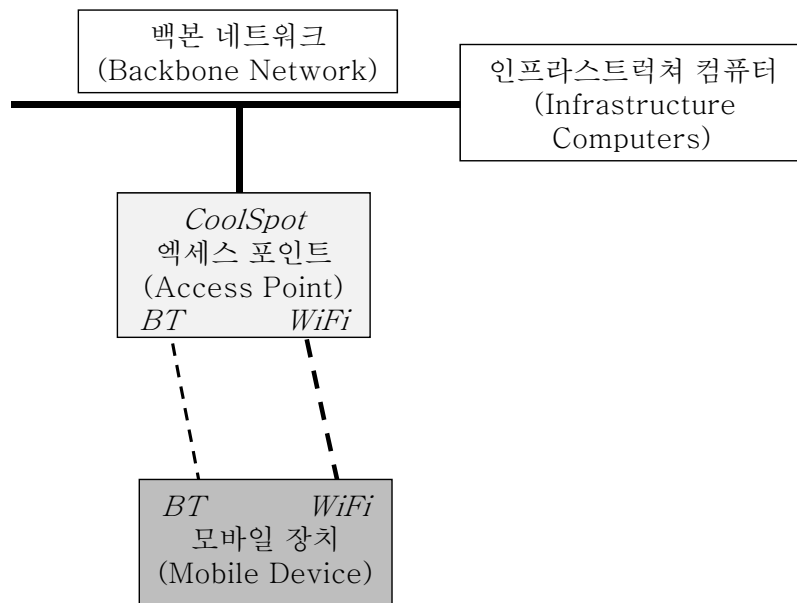


그림 2.3: *CoolSpots*의 서비스 구조

Pering는 [PAGW06]에서 *CoolSpots*이라 불리는 네트워크 인터페이스 선택 기법을 제안하였다. 그림 2.3은 *CoolSpots*의 서비스 구조를 보여준다. 그림 2.3에서와 같이 *CoolSpots* 서비스 구조는 크게 *CoolSpot* 액세스 포인트 (*CoolSpot* Access Point, *CoolSpot* AP)와 *CoolSpot* 액세스 포인트를 통해 다양한 응용 서비스를 이용하는 사용자 모바일 장치 (Mobile Device)로 구성되며, 두 장치 모두 데이터 통신을 위해

블루투스(Bluetooth)와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스를 가진다. *CoolSpot* 액세스 포인트는 백본 네트워크와 같은 일반 네트워크에 연결되어 모바일 장치의 외부 통신을 지원한다.

*CoolSpots*은 모바일 장치를 사용하는 사용자에게 의한 데이터 전송 및 수신을 위해 *CoolSpot* 액세스 포인트와 Wi-Fi나 블루투스 네트워크 인터페이스를 이용한다. 블루투스는 Wi-Fi와 비교할 때, 데이터 전송 속도는 떨어지지만 데이터 전송시 소모하는 에너지 소모량이 작다 [PAGW06]. 이와 반대로 Wi-Fi는 블루투스와 비교할 때, 데이터 전송 속도는 뛰어나지만 데이터 전송시 소모하는 에너지 소모량이 크다. 서비스 영역의 크기를 비교하면, Bluetooth는 10 m 내외의 통신 반경을 가지지만, Wi-Fi의 경우 약 100 m 내외의 통신 반경을 가진다. 따라서 요청되는 데이터 전송량이 작거나 현재 이용하는 네트워크 응용이 요구하는 네트워크 대역폭 (Network Bandwidth)이 작을 때에는 에너지 소모량이 작은 블루투스를 이용하여 데이터를 전송하고, 데이터 전송량이 크거나 요구되는 네트워크 대역폭이 큰 경우에는 데이터 전송 지연 시간이 증가하여 서비스 품질의 문제가 발생하지 않도록 에너지 소비량은 크지만 전송속도가 빠른 Wi-Fi를 이용하여 데이터를 전송한다. 즉, *CoolSpot*에서는 모바일 장치에서 동작하고 있는 응용은 기본적으로 블루투스 네트워크 인터페이스를 이용하고, 해당 응용이 사용하는 네트워크 대역폭이 블루투스가 지원할 수 있는 네트워크 대역폭을 넘어서면 Wi-Fi로 네트워크 연결을 전환한다. 연결 전환시에는 지원하는 네트워크 대역폭이나 서비스 응답 시간과 같은 기준이 상호 연결 전환의 기준으로 사용될 수 있다.

*CoolSpots*은 위와 같은 방식으로 블루투스와 Wi-Fi를 선택적으로 사용하여 모바일 장치의 에너지 소모량을 줄인다. 하지만, *CoolSpots*은 대규모의 네트워크 환경을 위한 것이 아니라 하나의 Wi-Fi 액세스 포인트로 서비스 될 수 있는 맥내 네트워크 환경과 같은 소규모의 네트워크 환경을 위한 네트워크 인터페이스 선택 기법이라는 단점을 가진다.

2.3 Context-For-Wireless

*Context-For-Wireless*는 GSM EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution)와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스를 가지는 모바일 장치에서의 데이터 전송시 에너지 효율성을 높이기 위한 기법이다 [RZ07]. 즉, 모바일 장치에서 데이터 전송시 에너지

효율성을 높이기 위해 GSM EDGE(셀룰러 (Celluar) 네트워크)와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스를 데이터 전송시 선택적으로 이용한다.

*Context-For-Wireless*에서 Rahmati는 네트워크 인터페이스 선택의 문제를 통계적인 선택 문제 (Statistical Decision Problem)로 모델링 하였다. 따라서 데이터 전송 요청이 발생하면, *Context-For-Wireless*는 근사화된 Wi-Fi의 연결 가능성 (Wi-Fi Availability)과 같은 현재 네트워크 환경을 고려하여 EDGE와 Wi-Fi를 이용하여 요청된 데이터를 전송할 때의 각각의 에너지 비용을 계산한다. 계산된 각각의 에너지 비용의 결과에 따라 Wi-Fi 연결을 시도하여 데이터를 전송하기도 하고, Wi-Fi 연결을 시도하지 않고 EDGE 셀룰러 네트워크를 이용하여 데이터를 전송하기도 한다. 즉, 선택적으로 EDGE와 Wi-Fi를 이용하여 요청된 데이터를 전송한다.

Wi-Fi 연결 시도 여부		데이터 전송 비용
시도하지 않음		셀룰러 (Celluar)를 통한 전송 비용
시도	성공	Wi-Fi 연결 비용 + 셀룰러 (Celluar)를 통한 전송 비용
	실패	Wi-Fi 연결 비용 + Wi-Fi를 통한 전송 비용

표 2.1: *Context-For-Wireless*의 데이터 전송 비용

표 2.1은 Wi-Fi 연결 시도에 따른 *Context-For-Wireless*의 데이터 전송 비용을 보여준다. 예를 들어, 데이터 전송 요청이 발생한 시점에 예측된 Wi-Fi와 EDGE를 통한 데이터 전송 에너지 비용에 따라 Wi-Fi 연결을 시도한다. 그 Wi-Fi 연결이 성공이라면 데이터 전송에 의한 총 에너지 소모량은 Wi-Fi 연결에 필요한 에너지 소모량과 Wi-Fi를 통한 데이터 전송에 사용된 에너지 소모량의 합으로 계산될 수 있다. Wi-Fi 연결을 시도하지 않는 경우에는 단순히 EDGE 네트워크 인터페이스를 통한 데이터 전송 비용만 발생한다. 이러한 방식으로 Wi-Fi와 EDGE 인터페이스를 선택적으로 사용함으로써 모바일 장치의 에너지 소모량을 줄일 수 있다. 따라서, *Context-For-Wireless*는 일정 주기마다 모니터링한 결과를 서버로 보고하는 것과 같이 주기적으로 데이터를 전송하는 네트워크 응용에 매우 적합하다.

하지만, *Context-For-Wireless*는 데이터 전송 요청이 발생할 때마다 EDGE와 Wi-Fi를 이용한 데이터 전송의 예상 비용을 계산하여야 하고, 해당 결과를 기반으로 Wi-Fi 연결을 선택적으로 시도하여 데이터 전송을 진행해야 한다. 따라서 데이터 전송 요청이 빈번히 발생할 경우, 데이터 전송 예상 비용을 계산하기 위한 비용이나 Wi-Fi 연결 비용이 크게 증가할 수 있다는 단점을 가진다. 또한, 데이터 전송중에는

네트워크 탐지 및 선택 동작을 수행하지 않으므로 대용량의 데이터를 전송할 때에는 데이터 전송 요청시 초기에 선택된 네트워크 인터페이스를 통해서 데이터가 지속적으로 전송되기 때문에 에너지 효율성 측면에서 바람직하지 않다.

2.4 SALSА

SALSА (Stable and Adaptive Link Selection Algorithm)는 3G와 Wi-Fi를 이용하는 다중 무선 인터페이스 선택 기법이다 [RPS⁺10]. 즉, 3G와 Wi-Fi를 네트워크 인터페이스로 가지는 모바일 장치에서 3G를 주 네트워크 (Primary Network)로 사용하고 에너지와 데이터 전송 효율을 증가시키기 위해 Wi-Fi를 부 네트워크 (Alternative Network)로 선택적으로 사용한다.

*SALSА*는 라프노프 최적화 프레임워크 (Lyapunov Optimization Framework) [GNT06, Nee06]를 기반으로 데이터 전송시 3G와 Wi-Fi를 선택적으로 사용할 수 있게 해주는 제어 함수 (Control Function)의 형태로 동작한다. 그림 2.4는 *SALSА*의 제어 선택 함수 (Control Decision Function)의 개념을 보여준다.

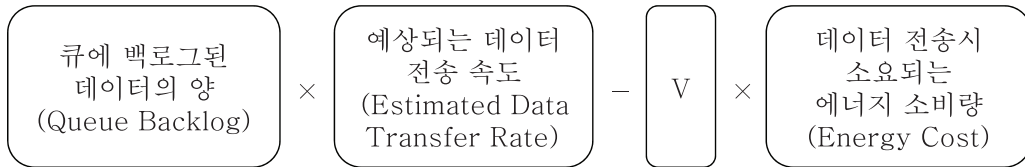


그림 2.4: 네트워크 인터페이스 선택에 사용되는 *SALSА*의 제어 선택 함수 (Control Decision Function)의 개념

*SALSА*는 고정된 특정 주기마다 모든 사용 가능한 네트워크 인터페이스를 탐지하고 탐지된 네트워크 인터페이스들에 대해서 그림 2.4와 같은 계산을 진행한다. 이후 계산 결과 값이 가장 큰 네트워크 인터페이스를 선택하여 네트워크 통신 연결을 진행하고 요청된 데이터를 전송한다.

그림 2.4에서 확인 할 수 있듯이, 일반적으로 *SALSА*에서는 예상되는 데이터 전송 속도가 크거나 데이터 전송시 소요되는 에너지 소비량이 작을수록 해당 무선 네트워크 인터페이스의 계산 값은 상대적으로 큰 값을 갖게 된다. 이때 데이터 전송 속도와 에너지 소비량의 반영 비율은 V 값에 의해 변하게 된다. 따라서 V 값도

*SALSA*의 성능에 큰 영향을 미친다.

이와 같이 *SALSA*는 고정된 일정 주기마다 네트워크 탐지 및 선택 동작을 수행하여 에너지 효율적인 네트워크 인터페이스나 높은 데이터 전송 속도를 지원할 수 있는 네트워크 인터페이스를 사용하여 데이터를 전송하여 모바일 장치의 에너지 효율성과 데이터 전송 효율성을 높인다. 실질적으로 *SALSA*에서는 3G와 Wi-Fi가 데이터 전송시 고려되는 네트워크 인터페이스이므로 3G나 Wi-Fi가 데이터 전송에 사용된다. 앞에서 언급한 것과 같이 *SALSA*는 네트워크를 탐지 및 선택을 수행하는 주기가 고정 주기로 설정되어 있다. 따라서 네트워크 환경의 변화를 고려하지 않고 고정 주기를 사용하기 때문에 설정된 네트워크 탐지 및 선택 주기에 따라 *SALSA*의 성능이 변하게 된다는 문제점을 가지고 있다. 즉, 고정 주기를 사용하므로 네트워크 환경이 급격히 변하거나 자주 변화하는 경우 *SALSA*의 효율성에 문제가 발생할 수 있다.

2.5 기타 기법

다중 무선 인터페이스를 이용하여 모바일 장치의 에너지 소모를 줄이기 위한 기타 기법으로는 *Cell2Notify* [ACW⁺07]와 *WINA* [CXC11]가 있다.

*Cell2Notify*는 모바일 장치에서 VoIP 응용을 효율적으로 서비스하기 위해서 제안된 기법이다. *Cell2Notify*는 VoIP 연결 요청을 셀룰러 (Cellular) 네트워크 인터페이스를 통해 감지한다. 이후 셀룰러 네트워크 인터페이스보다 에너지 소비와 데이터 전송 속도 측면에서 보다 효율적인 Wi-Fi 네트워크 인터페이스를 활성화시켜 VoIP 서비스를 제공하는 기법이다. 이와 같이 에너지 효율적인 Wi-Fi 인터페이스를 VoIP 요청시에만 사용하는 방식으로 VoIP 서비스의 품질을 높이고 모바일 장치의 에너지 효율성을 높인다.

*WINA*도 *Cell2Notify*와 유사하게 대기모드시 에너지 소모가 작은 보조적인 수신기 (Auxiliary Receiver)를 이용한다. 즉, 전화가 오거나 데이터 수신에 필요한 경우 보조적인 수신기가 수신에 필요하다라는 통지(Notification) 신호를 받고 데이터나 전화를 수신하기 위해서 무선 네트워크 인터페이스를 활성화 한다. 이후 통신이 완료되면 무선 네트워크 인터페이스는 다시 비활성화 상태로 전환되고, 보조적인 수신기는 다시 대기 상태로 전환하여 모바일 장치의 에너지 효율성을 증대시킨다.

제 3 장 에너지 효율적인 무선 네트워크 인터페이스 선택 기법 (AWNIS)

본 장에서는 무선 네트워크 인터페이스 선택 주기에 따른 에너지 소모량을 모델링하고 무선 네트워크 인터페이스를 사용하는 방법에 따른 데이터 전송 소요 시간을 모델링한다. 이후 모델링한 에너지 소모량과 데이터 전송 소요 시간 모델의 분석 결과를 기반으로한 에너지 효율적인 무선 네트워크 인터페이스 선택 기법에 대해서 서술한다.

3.1 무선 네트워크 인터페이스 선택 주기에 따른 비용 모델링

3.1.1 가정 사항

다중 무선 네트워크 인터페이스를 가지는 모바일 장치의 에너지 소비량과 데이터 전송 소요 시간을 모델링하기 위해 모바일 장치는 두 개의 무선 네트워크 인터페이스를 가진다고 가정한다.

두 개의 무선 네트워크 인터페이스는 주 네트워크 인터페이스 (Primary Network Interface)와 부 네트워크 인터페이스 (Alternate Network Interface)라고 정의한다. 표 3.1은 주 네트워크와 부 네트워크의 특성을 나타낸다. 이러한 특성은 일반적으로 데이터 통신에 많이 사용되는 3G 네트워크와 Wi-Fi 네트워크의 특성에 부합한다.

- 주 네트워크 (Primary Network) - 데이터 전송시 에너지 소비량이 크고, 데이터 전송 속도가 느리고, 가용성 (Availability)이 높음
- 부 네트워크 (Alternate Network)- 데이터 전송시 에너지 소비량이 작음, 데이터 전송 속도가 빠르고, 가용성이 작음

모바일 장치는 에너지 소모량이 작고 높은 가용성을 가지는 3G와 같은 주 네트워크 인터페이스를 이용하여 데이터 전송시 통신 연결을 진행하고 데이터를 항상

	주 네트워크	부 네트워크
데이터 전송 속도	느림	빠름
에너지 소모량	큼	적음
가용성	큼	작음
예	3G	Wi-Fi

표 3.1: 주 네트워크와 부 네트워크의 특성

전송할 수 있다고 가정한다. 반면, 부 네트워크는 Wi-Fi와 같이 특정 서비스 영역에서만 사용이 가능하여 가용성이 작다고 가정한다.

표 3.1과 같이 부 네트워크 인터페이스는 주 네트워크 인터페이스와 비교할 때 더 높은 데이터 전송 속도를 가지고 더 작은 에너지 소모량을 갖는다고 가정한다. 부 네트워크에 연결시 다수의 연결 가능한 액세스 포인트 (Access Point)로 연결이 가능할 경우에는 가장 링크 품질 (Link Quality)이 좋은 액세스 포인트로 통신 연결을 진행한다. 따라서, 에너지 효율적이고 더 높은 데이터 전송 속도를 갖는 부 네트워크의 사용이 가능한 경우에는 주 네트워크 인터페이스의 통신 연결을 해제하고 부 네트워크 인터페이스를 이용하여 데이터 통신을 진행한다.

일반적으로 3G와 같은 주 네트워크 인터페이스는 비교적 먼 거리에 있는 기지국 (Base Station)과 데이터 통신을 하고 Wi-Fi와 같은 부 네트워크 인터페이스는 비교적 거리가 가까운 액세스 포인트 (Access Point)나 가까운 기지국과 데이터 통신을 하기 때문에 이와 같은 특성이 나타난다. 이같은 가정사항들은 [RZ07]와 [RPS⁺10]에서도 찾아볼 수 있다. 이후부터는 3G를 주 네트워크로 선택하고 Wi-Fi를 부 네트워크로 선택하여 에너지 소모량과 데이터 전송 소요 시간을 모델링 한다.

3.1.2 3G와 Wi-Fi를 이용한 데이터 전송

가정 사항에서 명시했듯이 3G와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스를 지원하는 모바일 장치는 기본적으로 3G와 같은 가용성이 높은 주 네트워크를 이용하여 데이터를 전송한다. Wi-Fi와 같은 부 네트워크의 액세스 포인트나 기지국의 서비스 지역과 반경은 주 네트워크와 비교하였을때 매우 제한적이어서 가용성이 낮다 [RZ07, RPS⁺10]. 반면, 데이터 전송시 Wi-Fi와 같은 부 네트워크의 에너지 효율성은 3G와 같은 주 네트워크 보다 뛰어나다. 일반적으로 데이터 전송시 3G가 Wi-Fi보다 약 2배 정도의 에너지를 더 소모한다 [BBV09]. 따라서, Wi-Fi가 사용이 가능한 네트워크 환경이나

지역이라면 모바일 장치의 에너지 소모를 줄이기 위해서 3G 대신 Wi-Fi를 사용하여 요청된 데이터를 전송하여야 한다.

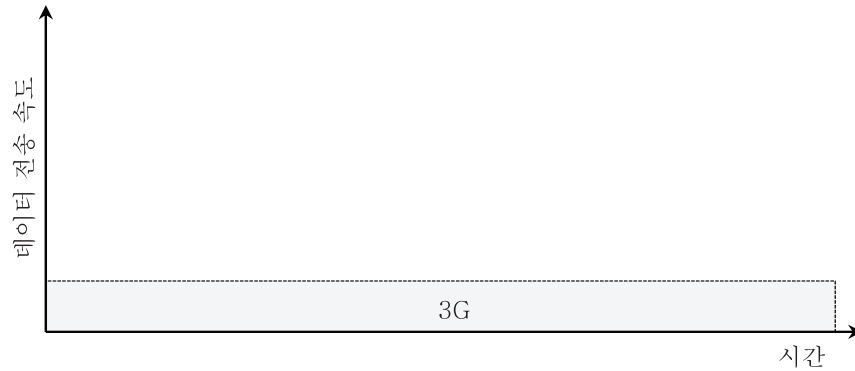


그림 3.1: 3G 네트워크의 가용성의 예

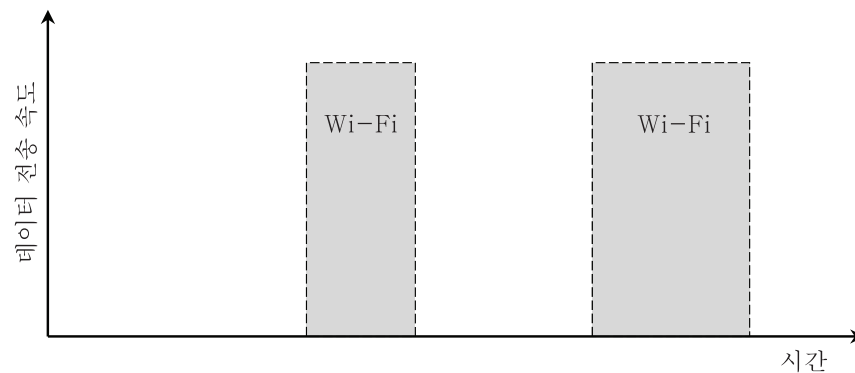


그림 3.2: Wi-Fi 네트워크의 가용성의 예

그림 3.1과 그림 3.2는 각각 3G와 Wi-Fi의 시간에 따른 각 네트워크의 가용성의 예를 보여준다. 그림 3.1과 같이 3G는 Wi-Fi 보다 낮은 데이터 전송 속도로 항상 데이터를 전송할 수 있다 (가용성이 Wi-Fi 보다 매우 큼). 하지만, Wi-Fi는 그림 3.2에서와 같이 항상 사용 가능 하지는 않지만, 높은 데이터 전송 속도로 데이터를 전송할 수 있다 (가용성은 3G에 비해 작지만, 데이터 전송 속도가 좋음).

따라서 그림 3.1과 그림 3.2와 같은 네트워크 환경이라면, 모바일 장치의 에너지 소모를 줄이고 데이터 전송 지연 시간을 줄이기 위해서는 3G와 Wi-Fi를 서로 보완적으로 사용하여야 한다. 그림 3.3은 3G와 Wi-Fi를 서로 보완적으로 사용하여

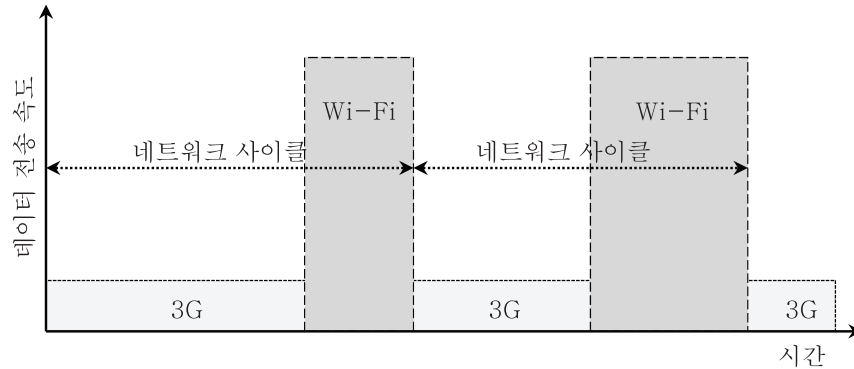


그림 3.3: 3G와 Wi-Fi를 이용한 데이터 전송의 예

데이터를 전송하는 예를 보여준다. 즉, 그림 3.3과 같이 Wi-Fi가 사용이 가능한 경우에는 3G 대신에 Wi-Fi를 사용하여 데이터를 전송해야 하고, Wi-Fi를 사용할 수 없다면 3G를 이용하여 데이터를 전송해야 한다.

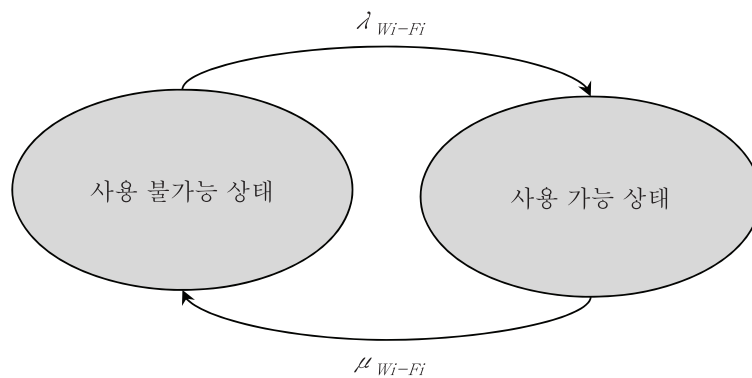


그림 3.4: Wi-Fi 네트워크의 상태 다이어그램 (State Diagram) 모델

그림 3.2의 예를 기반으로 Wi-Fi의 가용성에 따라, 즉 Wi-Fi의 사용 가능 여부에 따라 Wi-Fi의 상태를 사용 가능 상태 (*Available State*)와 사용 불가능 상태 (*Unavailable State*) 두 가지 상태로 나눌 수 있다. 이는 그림 3.4와 같은 형태의 상태 다이어그램으로 모델링 및 표현이 가능하다.

그림 3.4에서 λ_{Wi-Fi} 는 Wi-Fi의 사용 불가능 상태에서 사용 가능 상태로의 전이

기호	의미
λ_{Wi-Fi}	Wi-Fi의 사용 불가능 상태에서 사용 가능 상태로의 전이율
μ_{Wi-Fi}	Wi-Fi의 사용 가능 상태에서 사용 불가능 상태로의 전이율
e_{3G}	3G의 데이터 전송시 에너지 소모량 (J/MB)
e_{Wi-Fi}	Wi-Fi의 데이터 전송시 에너지 소모량 (J/MB)
e_{NIS}	네트워크 인터페이스 탐지 및 선택시 에너지 소모량 ($J/동작$)
$T_{3G}[t]$	t 번째 네트워크 사이클에서의 3G 네트워크 사용 시간 (초)
$T_{Wi-Fi}[t]$	t 번째 네트워크 사이클에서의 Wi-Fi 네트워크 사용 시간 (초)
$E[T_{3G}]$	한 네트워크 사이클에서 3G 사용 시간의 기대값 (초)
$E[T_{Wi-Fi}]$	한 네트워크 사이클에서 Wi-Fi 사용 시간의 기대값 (초)
$E[T_{NS}]$	한 네트워크 사이클의 길이 (시간) 기대값 (초), $E[T_{3G}] + E[T_{Wi-Fi}]$
$A_{Wi-Fi}[t]$	t 번째 네트워크 사이클에서의 Wi-Fi의 가용성 (Availability), $0 \leq A_{Wi-Fi}[t] \leq 1$
$AR[t]$	t 번째 네트워크 사이클에서의 평균 데이터 전송 요청량 (MB/s)
$E[AR]$	한 네트워크 사이클에서의 데이터 전송 요청량의 기대값 (MB/s), $E[AR] = \alpha \times AR[t] + (1 - \alpha) \times E[AR]$
$R_{3G}[t]$	t 번째 네트워크 사이클에서 3G의 평균 데이터 전송 속도 (MB/s)
$R_{Wi-Fi}[t]$	t 번째 네트워크 사이클에서 Wi-Fi의 평균 데이터 전송 속도 (MB/s)

표 3.2: 모델링에 사용된 기호와 그 의미 (1/2)

율을 의미하고, μ_{Wi-Fi} 는 Wi-Fi의 사용 가능 상태에서 사용 불가능 상태로의 전이율을 의미한다. 즉, 3G와 Wi-Fi 네트워크의 사용 패턴이나 Wi-Fi 네트워크 상태는 사용 가능 상태와 사용 불가능 상태가 반복되는 연속 마코프 프로세스 (Continuous Markov Process) [Tri02, GSTH13, Ros06, Ros01, Bha08]로 모델링이 가능하다. 이때 λ_{Wi-Fi} 와 μ_{Wi-Fi} 는 Wi-Fi의 가용성 (Availability)에 영향을 미칠 수 있는 네트워크 통신 환경의 변화나 사용자의 이동속도와 같은 다양한 요소의 영향에 따라 변하게 된다.

실제 통신 환경에서는 데이터 전송시 정확한 Wi-Fi의 가용성이나 Wi-Fi의 사용 가능 시점과 같은 정보를 정확하게 알 수 없으므로 주기적으로 에너지 효율적인 Wi-Fi 네트워크를 사용하기 위한 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 동작을 수행해

기호	의미
$E[R_{3G}]$	3G의 평균 데이터 전송 속도 기대값 (MB/s), $E[R_{3G}] = \alpha \times R_{3G}[t] + (1 - \alpha) \times E[R_{3G}]$
$E[R_{Wi-Fi}]$	Wi-Fi의 평균 데이터 전송 속도 기대값 (MB/s), $E[R_{Wi-Fi}] = \alpha \times R_{Wi-Fi}[t] + (1 - \alpha) \times E[R_{Wi-Fi}]$
δ_{NIS}	네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기 (초)
$E[N_{NIS}(\delta_{NIS})]$	δ_{NIS} 를 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기로 사용했을 때, 한 네트워크 사이클에서의 평균 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 동작의 수행 횟수의 기대값 (회)
$P_{NIS_Succ}(\delta_{NIS})$	δ_{NIS} 의 주기로 네트워크 인터페이스를 탐지 및 선택할 때, 하나의 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택이 성공인 확률, $P_{NIS_Succ}(\delta_{NIS}) \leq 1$
$P_{NIS_Fail}(\delta_{NIS})$	δ_{NIS} 의 주기로 네트워크 인터페이스를 탐지 및 선택할 때, 하나의 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택이 실패인 확률, $P_{NIS_Fail}(\delta_{NIS}) \leq 1$
$TC_{Transfer}$	데이터 전송을 위해 한 네트워크 사이클에서 사용한 3G와 Wi-Fi의 총 에너지 소모량 (J)
TC_{NIS}	한 네트워크 사이클에서 수행한 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택에 소요된 총 에너지 소모량 (J)
TC_{HO}	한 네트워크 사이클에서 3G와 Wi-Fi 사이의 핸드오버 (Handover)에 소요된 총 에너지 소모량 (J)
TC_{Device}	모바일 장치가 한 네트워크 사이클에서 사용한 총 에너지 소모량 (J/MB)

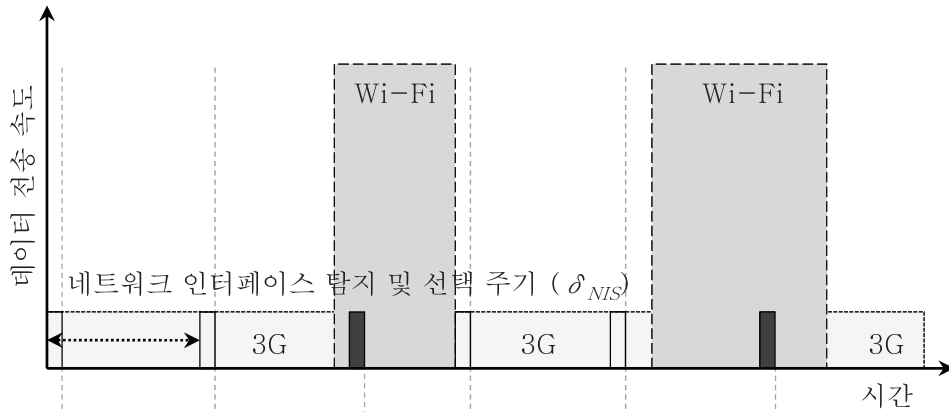
표 3.3: 모델링에 사용된 기호와 그 의미 (2/2)

야 한다. 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 동작을 수행할 때는 Wi-Fi 네트워크의 사용 가능 여부를 체크해야하고, 상태 확인 결과 Wi-Fi 네트워크가 사용 가능한 상태라면, 3G에서 Wi-Fi로 네트워크 연결을 전환한다.

그림 3.5는 앞서 설명한 것과 같이 주기적으로 사용 가능한 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 동작을 수행할 때 3G와 Wi-Fi 네트워크의 실제 사용의 예를 보여준다. 3G와 Wi-Fi 네트워크의 실제 사용은 Wi-Fi 네트워크의 실제 가용성과는 다를 수 있다. 그림 3.5에서와 같이 Wi-Fi가 연결된 후에는 네트워크 탐지 및 선택 동작을 수행할 필요가 없으므로 탐지 및 선택 동작은 수행하지 않는다. 이후 Wi-Fi 연결이 네트워크 환경의 변화에 따라 강제로 끊어지거나 종료되게 되면 또 다시 주기적으로 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 동작을 수행한다.

그림 3.5의 예에서 주기적인 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택에 의한 모바일

3G와 Wi-Fi의 가용성 상태 및 주기적인 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 동작의 수행



주기적인 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택에 의한 3G와 Wi-Fi의 사용의 실제적인 예

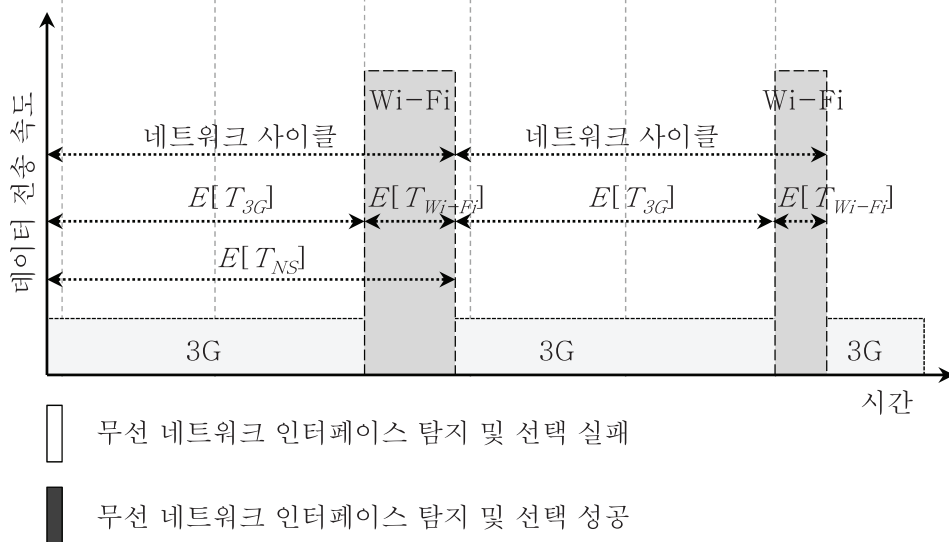


그림 3.5: 주기적인 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 동작에 의한 3G와 Wi-Fi 네트워크 사용의 예

장치의 에너지 소모량을 모델링하기 위해서 *네트워크 사이클 (Network Cycle)*이라는 개념을 정의한다. 네트워크 사이클은 하나의 연속된 3G와 Wi-Fi 네트워크의 사용 시간을 갖는 주기로 정의한다. 특정 네트워크 사이클의 시간은 해당 네트워크 사이클에서 사용된 3G와 Wi-Fi를 이용한 데이터 통신 시간의 합으로 계산할 수 있다. 네트워크 환경의 변화가 없거나 일정하다면, 각각의 네트워크 사이클의 주기

는 변하지 않는다. 하지만, 각각의 네트워크 사이클에서 데이터 전송에 사용된 3G와 Wi-Fi의 사용 시간은 사용자의 이동성과 같은 다양한 네트워크 환경의 변화에 따라 변할 수 있으므로 각각의 네트워크 사이클의 시간은 일반적으로 서로 다르다. 따라서 이런 3G와 Wi-Fi 네트워크의 주기적인 사용 패턴은 그림 3.4를 기반으로 교대 갱신 프로세스 (*Alternating Renewal Process*)로 모델링할 수 있다 [Tri02].

3.1.3 에너지 소모량 모델링

한 네트워크 사이클에서의 에너지 소모량 분석을 통해 모바일 장치의 에너지 소모량을 계산하고 분석할 수 있다. 이때 모바일 장치가 데이터 전송을 위해 소모하는 에너지 소모량은 수식 3.1과 같이 표현하여 모델링하고 계산할 수 있다.

수식 3.1에서 TC_{Device} 는 모바일 장치가 한 네트워크 사이클 동안 소모하는 총 에너지 소비량을 의미한다. 데이터 통신에 의한 모바일 장치의 에너지 소모량 (TC_{Device})은 크게 네 가지 요소로 구성되며, 이는 3G 사용에 의한 에너지 소모량, Wi-Fi 사용에 의한 에너지 소모량, 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택에 의한 에너지 소모량, 마지막으로 3G와 Wi-Fi간의 핸드오버 (Handover)에 의한 에너지 소모량이다.

- $TC_{Transfer}$ - 한 네트워크 사이클에서 데이터 전송시 3G와 Wi-Fi 사용에 의한 에너지 소모량
- TC_{NIS} - 한 네트워크 사이클에서 수행한 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택에 의한 에너지 소모량
- TC_{HO} - 한 네트워크 사이클에서 3G와 Wi-Fi 호전환 (Handover)에 의한 에너지 소모량

$$TC_{Device} = TC_{Transfer} + TC_{NIS} + TC_{HO} \quad (3.1)$$

3G와 Wi-Fi의 사용에 의한 에너지 소모량 ($TC_{Transfer}$)은 데이터 전송량과 데이터 전송시 소요되는 3G와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스의 에너지 소모량에 크게

영향을 받는다. 각 3G와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스의 에너지 소모량은 고정적인 값을 가진다고 생각할 수 있다. 따라서 $TC_{Transfer}$ 는 데이터 전송량에 더 큰 영향을 받는다.

네트워크 인터페이스 탐지 및 선택에 의한 에너지 소모량 (TC_{NIS})은 각 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 동작에 의한 에너지 소모량은 고정된 에너지 소모량을 갖는다고 생각할 수 있으므로, 수행된 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 동작을 수행한 횟수에 의해 크게 영향을 받는다.

마지막으로 3G와 Wi-Fi간의 핸드오버 에너지 소모량 (TC_{HO})은 한 네트워크 사이클에서 수행되는 총 핸드오버의 수행은 오직 한 번만 발생하므로 고정적인 에너지 소모량을 갖는다. 또한 [Qiu11]과 [SMAA08]에 의하면 핸드오버 지연 시간은 0에 가깝게 줄일 수 있어 매우 작은 지연 시간을 가지므로 핸드오버에 의한 에너지 소모량 (TC_{HO})이 총 에너지 소모량 (TC_{Device})에 미치는 영향은 매우 미미하다고 생각할 수 있다. 따라서 한 네트워크 사이클에서 모바일 장치가 소모하는 총 에너지 소모량, TC_{Device} 는 수식 3.2와 같이 좀 더 단순화하여 모델링 할 수 있다.

$$TC_{Device} = TC_{Transfer} + TC_{NIS} \quad (3.2)$$

따라서, 모바일 장치가 데이터 전송시 소모하는 에너지 소모량은 데이터 전송에 의한 에너지 소모량과 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택에 의한 에너지 소모량에 크게 영향을 받게 된다. 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택에 의한 에너지 소모량은 해당 탐지 및 선택 주기에 의해 변하게 되므로 탐지 및 선택 주기를 네트워크 환경의 변화에 따라 효율적으로 조절함으로써 모바일 장치의 에너지 소모량을 줄일 수 있다.

효율적인 무선 네트워크 선택 기법을 제안하기에 앞서 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기에 의한 모바일 장치의 에너지 소모량을 모델링하고, 3G와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스를 사용하는 방법에 따른 데이터 전송 소요 시간을 모델링한다. 이후 모델링한 에너지 소모량 모델과 데이터 전송 소요 시간 모델을 이용하여 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기에 따른 모바일 장치의 에너지 소모량과 데이터 전송 지연 시간을 분석한다.

표 3.2와 표 3.3은 에너지 소모량 모델링과 데이터 전송 소요 시간 모델링에 사용된 기호와 그 의미를 보여준다. 만약, 요청되는 데이터 전송량이 상대적으로 적을 경우에는 에너지 효율적인 Wi-Fi를 사용하여 데이터를 전송하는 것보다 3G를 이용하여 데이터를 전송하는 것이 더 효율적이다. 그 이유는 Wi-Fi에 연결하기 위한 Wi-Fi 탐지 (Scanning) 비용을 포함한 연결 비용을 무시할 수 없기 때문이다 [BBV09]. 따라서 에너지 소비량을 모델링할 때 요청되는 데이터 전송량도 고려하여야 한다.

에너지 소비량을 분석하기 위해 우선 두개의 랜덤 변수 (Random Variable) $E[T_{3G}]$ 와 $E[T_{Wi-Fi}]$ 를 정의한다. $E[T_{3G}]$ 와 $E[T_{Wi-Fi}]$ 는 각각 한 네트워크 사이클에 3G와 Wi-Fi 네트워크를 사용하는 시간의 기대값을 의미한다. $E[T_{3G}]$ 와 $E[T_{Wi-Fi}]$ 는 네트워크 탐지 및 선택 주거나 네트워크 환경에 따라 값이 변하게 된다. $AR[t]$ 는 t 번째 네트워크 사이클에서 발생한 데이터 전송 요청량의 평균값 (MB/s)를 의미하고, $E[AR]$ 는 한 네트워크 사이클에서의 평균 데이터 전송 요청량의 기대값을 의미한다. e_{3G} 와 e_{Wi-Fi} 는 각각 3G의 데이터 통신 에너지 소모량 (J/MB)과 Wi-Fi의 데이터 통신 에너지 소모량 (J/MB)을 의미한다. 따라서 3G와 Wi-Fi의 단위 시간당 에너지 소모량은 $e_{3G} \times E[AR]$ 와 $e_{Wi-Fi} \times E[AR]$ 와 같고, 한 네트워크 사이클에서 소모되는 3G와 Wi-Fi의 사용에 의한 총 에너지 소모량은 수식 3.3과 같이 정의하고 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} TC_{Transfer} &= e_{3G} \times E[AR] \times E[T_{3G}] + e_{Wi-Fi} \times E[AR] \times E[T_{Wi-Fi}] \\ &= (e_{3G} \times E[T_{3G}] + e_{Wi-Fi} \times E[T_{Wi-Fi}]) \times E[AR] \end{aligned} \quad (3.3)$$

앞에서 설명한 것과 같이, 에너지 효율적인 Wi-Fi 네트워크를 사용하기 위해서는 주기적으로 무선 네트워크 인터페이스 탐색 및 선택하는 동작을 수행하여야 한다. 그림 3.5와 같이 무선 네트워크 인터페이스 탐색 및 선택 동작의 수행 결과는 성공과 실패 두 가지의 경우로 나누어 생각할 수 있다. 성공의 경우에는 연결을 진행할 수 있는 한 개 이상의 Wi-Fi 액세스 포인트 (Access Point)를 탐지 (Scanning)를 통해서 찾은 경우로 생각 할 수 있다. 이와는 반대로, 실패의 경우에는 연결을 진행할 수 있는 Wi-Fi 액세스 포인트를 발견하지 못한 경우로 생각 할 수 있다. 이때 발생하는 무선 네트워크 인터페이스 탐색 및 선택 동작에 의해 발생하는 에너지 소모량은

다음과 같이 계산할 수 있다.

우선, 한 네트워크 사이클에서 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 동작에 의해 발생하는 총 에너지 소모량 (TC_{NIS}) 를 계산하기 위해서는 한 네트워크 사이클에서 수행되는 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 동작의 수행 횟수를 계산하여야 한다. 각각의 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 동작은 베르누이 시행 (Bernoulli Trial) 으로 모델링 될 수 있다. 각 시도의 결과는 앞에서 설명한 것과 같이 Wi-Fi의 현재 가용성에 따라 성공과 실패로 생각할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P\{\text{Wi-Fi가 } t\text{초 후 사용 불가능 상태} | \text{사용 불가능 상태}\} &= \\
 \frac{\mu_{Wi-Fi}}{\lambda_{Wi-Fi} + \mu_{Wi-Fi}} + \frac{\lambda_{Wi-Fi}}{\lambda_{Wi-Fi} + \mu_{Wi-Fi}} \times e^{-(\lambda_{Wi-Fi} + \mu_{Wi-Fi})t} & \\
 \\
 P\{\text{Wi-Fi가 } t\text{초 후 사용 가능 상태} | \text{사용 불가능 상태}\} &= \\
 \frac{\lambda_{Wi-Fi}}{\lambda_{Wi-Fi} + \mu_{Wi-Fi}} - \frac{\lambda_{Wi-Fi}}{\lambda_{Wi-Fi} + \mu_{Wi-Fi}} \times e^{-(\lambda_{Wi-Fi} + \mu_{Wi-Fi})t} & \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

Wi-Fi 네트워크의 연결 사용 가능 상태와 사용 불가능 상태를 그림 3.4와 같이 모델링 하였으므로, 초기 상태가 사용 불가능한 상태에서 t 초 후, Wi-Fi 네트워크가 사용 가능한 상태일 확률과 사용 불가능 상태일 확률은 각각 수식 3.4와 같이 연속 마코프 프로세스 (Continuous Markov Process) 의 일시 상태 확률 (Transient State Probability) 에 의해 계산될 수 있다 [Tri02].

$$\begin{aligned}
 P_{NIS_Fail}(\delta_{NIS}) &= \\
 \frac{\mu_{Wi-Fi}}{\lambda_{Wi-Fi} + \mu_{Wi-Fi}} + \frac{\lambda_{Wi-Fi}}{\lambda_{Wi-Fi} + \mu_{Wi-Fi}} \times e^{-(\lambda_{Wi-Fi} + \mu_{Wi-Fi})\delta_{NIS}} & \\
 \\
 P_{NIS_Succ}(\delta_{NIS}) &= \\
 \frac{\lambda_{Wi-Fi}}{\lambda_{Wi-Fi} + \mu_{Wi-Fi}} - \frac{\lambda_{Wi-Fi}}{\lambda_{Wi-Fi} + \mu_{Wi-Fi}} \times e^{-(\lambda_{Wi-Fi} + \mu_{Wi-Fi})\delta_{NIS}} & \quad (3.5)
 \end{aligned}$$

네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기를 δ_{NIS} 로 사용할 때 각 네트워크 인터

페이스 탐지 및 선택의 결과가 성공이나 실패일 확률은 수식 3.4를 기반으로 수식 3.5와 같이 표현하고 모델링하여 계산할 수 있다.

따라서, 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택이 최초로 성공할 때까지 필요한 탐지 및 선택 동작의 수행 횟수의 기대값은 베르누이 시행의 평균 기대값과 동일하게 계산할 수 있으므로 한 네트워크 사이클에서의 평균 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 동작의 수행 횟수의 기대값 ($E[N_{NIS}]$)은 수식 3.6과 같이 모델링하여 계산할 수 있다.

$$E[N_{NIS}(\delta_{NIS})] = \frac{1}{P_{NIS_Succ}(\delta_{NIS})} \quad (3.6)$$

계산된 $E[N_{NIS}]$ 와 δ_{NIS} 를 이용하여 한 네트워크 사이클에서 3G를 사용하는 평균 기대 시간 ($E[T_{3G}]$)은 수식 3.7과 같이 모델링하고 계산할 수 있다.

$$E[T_{3G}] = E[N_{NIS}(\delta_{NIS})] \times \delta_{NIS} \quad (3.7)$$

한 네트워크 사이클에서 Wi-Fi를 사용하는 평균 기대 시간 ($E[T_{Wi-Fi}]$)은 지수 분포의 (Exponential Distribution) 무기억 성질 (Memory-less Property)에 의해서 수식 3.8과 같이 계산할 수 있다.

$$E[T_{Wi-Fi}] = \frac{1}{\mu_{Wi-Fi}} \quad (3.8)$$

마지막으로, 한 네트워크 사이클에서 발생하는 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 동작 수행에 의한 에너지 소모량 (TC_{NIS})은 앞에서 얻어진 δ_{NIS} 를 탐지 및 선택 주기로 사용 할 때의 $E[N_{NIS}(\delta_{NIS})]$ 와 e_{NIS} 를 이용하여 수식 3.9와 같이 모델링하여 계산할 수 있다.

$$TC_{NIS}(\delta_{NIS}) = e_{NIS} \times E[N_{NIS}(\delta_{NIS})] \quad (3.9)$$

위에서 모델링된 각각의 수식들을 이용하면, 한 네트워크 사이클에서 소모되는 데이터 전송 요청량과 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기에 의한 모바일 장치의 에너지 소모량 (TC_{Device})을 계산하고 분석 할 수 있다.

3.1.4 데이터 전송 소요 시간 모델링

데이터 전송 지연 시간은 데이터 전송의 효율성을 평가하는 중요한 요소 중의 하나이다. 동일한 양의 데이터를 전송할 때, 좀 더 빠른 전송 속도를 지원할 수 있는 네트워크 인터페이스를 사용하면 데이터 전송 소요 시간을 줄여 데이터 전송 지연 시간을 감소시킬 수 있다.

본 절에서는 3G와 Wi-Fi 무선 인터페이스를 가지는 모바일 장치의 데이터 전송 시 네트워크 인터페이스를 사용하는 방법에 따른 데이터 전송 소요 시간을 모델링한다. 3G와 Wi-Fi 무선 인터페이스를 가지는 모바일 장치를 가정하므로 데이터 전송시 다음과 같은 세 가지의 네트워크 인터페이스 사용 방법을 생각할 수 있고 각각의 방법마다 데이터 전송에 소요된 시간을 모델링하여 각 네트워크 인터페이스 사용 방법의 데이터 전송 지연 시간을 분석할 수 있다. 데이터 전송 소요 시간을 모델링할 때 요청된 데이터의 큐잉 지연 시간 (Queueing Delay)은 고려하지 않는다.

- 3G 만을 사용하는 경우 (3G Only)
- Wi-Fi 만을 사용하는 경우 (Wi-Fi Only)
- 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 경우 (Both 3G and Wi-Fi)

3.1.4.1 3G 만을 사용하는 경우의 데이터 전송 소요 시간

데이터 전송시 3G 만을 사용하는 경우의 데이터 전송에 소요되는 시간은 수식 3.10 과 같이 모델링하고 계산할 수 있다. 수식 3.10에서 $E[D_{3G}]$ 는 3G 만을 사용하여 데이터를 전송할 때의 데이터 전송 소요 시간을 의미한다. $E[R_{3G}]$ 는 3G를 이용

하여 데이터를 전송할 때, 3G 네트워크가 지원하는 데이터 전송 속도를 의미하고, 마지막으로 BD 는 모바일 장치의 데이터 전송 큐에 백-로그 (Back-logged) 되어 있거나 전송 요청된 데이터의 양을 의미한다. 3G 만을 사용하여 데이터를 전송하는 경우의 데이터 전송 소요 시간은 수식 3.10과 같이 3G의 데이터 전송 속도 ($E[R_{3G}]$)와 요청된 데이터 전송량 (BD)에 따라 변한다.

$$E[D_{3G}] = \frac{BD}{E[R_{3G}]} \quad (3.10)$$

3.1.4.2 Wi-Fi 만을 사용하는 경우의 데이터 전송 소요 시간

Wi-Fi 만을 사용하여 데이터를 전송하는 경우, 3G에 비해 Wi-Fi가 데이터 전송시 소모하는 에너지 소모량이 적기 때문에 데이터 전송에 의한 에너지 소모를 줄일 수 있어 모바일 장치의 에너지 효율성을 향상시킬 수 있다는 장점을 갖는다. 하지만, Wi-Fi의 서비스 지역이 제한적이므로 Wi-Fi를 항상 사용할 수 없어 데이터 전송시 소요되는 시간이 증가할 수 있다. 결과적으로 전체적인 데이터 전송 지연 시간이 증가 할 수 있다.

Wi-Fi 만을 사용하여 데이터를 전송하는 경우의 데이터 전송 소요 시간은 수식 3.11과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} E[D_{Wi-Fi}] &= E[A_{Wi-Fi}] \times \left((NS_{Wi-Fi} - 1) \times E[T_{3G}] + \frac{BD}{E[R_{Wi-Fi}]} \right) \\ &+ (1 - E[A_{Wi-Fi}]) \times \left(NS_{Wi-Fi} \times E[T_{3G}] + \frac{BD}{E[R_{Wi-Fi}]} \right) \\ \text{where, } NS_{Wi-Fi} &= \left\lceil \frac{BD}{(E[R_{Wi-Fi}] \times E[T_{Wi-Fi}])} \right\rceil \end{aligned} \quad (3.11)$$

수식 3.11에서, NS_{Wi-Fi} 는 Wi-Fi 만을 사용하여 데이터를 전송할 때 필요한 최소한의 네트워크 사이클의 수를 의미한다. 또한 데이터 전송 요청은 네트워크 사이클에서 3G를 사용하고 있을 때와 Wi-Fi를 사용하고 있을 때, 모두의 경우에서 발생할 수 있다. 즉, 데이터 전송이 Wi-Fi 구간에서 시작되면 네트워크 사이클은 Wi-Fi와 3G의 순서로 구성되게 되고, 데이터 전송이 3G 구간에서 시작되면 네트워크

사이클은 3G와 Wi-Fi의 순서대로 구성되게 된다. 따라서 데이터 전송 소요 시간을 계산할 때에는 Wi-Fi의 가용성 (Availability)을 고려하여 두 경우를 모두 반영하여 전송 소요 시간을 모델링하여야 한다. Wi-Fi의 가용성을 의미하는 $E[A_{Wi-Fi}]$ 는 $\frac{E[T_{Wi-Fi}]}{E[T_{3G}] + E[T_{Wi-Fi}]}$ 로 계산할 수 있다.

3.1.4.3 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 경우의 데이터 전송 소요 시간

3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 경우에는 그림 3.5와 같이 3G와 Wi-Fi를 상호 보완적으로 사용하여 데이터를 전송한다. 즉, 기본적으로 3G를 이용하여 데이터를 전송하고, 주기적으로 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 동작을 수행하면서 Wi-Fi에 연결하여 데이터를 전송한다. 따라서 대량의 데이터를 전송하는 경우에는 전송 속도가 빠르고 에너지 효율적인 Wi-Fi와 3G를 모두 사용하여 데이터를 전송하므로 에너지 효율성과 데이터 전송 효율성을 높일 수 있다. 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 경우의 데이터 전송 소요 시간은 수식 3.12와 같이 모델링하여 계산할 수 있다.

수식 3.12에서, $NS_{3G|Wi-Fi}$ 는 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하여 데이터를 전송할 때 필요한 최소한의 네트워크 사이클의 수를 의미한다. Wi-Fi만을 사용하여 데이터를 전송하는 경우와 마찬가지로 데이터 전송 요청은 3G나 Wi-Fi 두 상태 모두에서 발생할 수 있으므로 Wi-Fi만을 사용하는 경우와 동일하게 Wi-Fi의 가용성을 고려하여 데이터 전송 소요 시간을 모델링하여야 한다.

$$\begin{aligned}
E[D_{3G|Wi-Fi}] &= E[A_{Wi-Fi}] \times ((NS_{3G|Wi-Fi} - 1) \times (E[T_{3G}] + E[T_{Wi-Fi}]) + \beta_1) \\
&+ (1 - E[A_{Wi-Fi}]) \times ((NS_{3G|Wi-Fi} - 1) \\
&\quad \times (E[T_{3G}] + E[T_{Wi-Fi}]) + \beta_2) \\
&= E[A_{Wi-Fi}] \times ((NS_{3G|Wi-Fi} - 1) \times E[T_{NS}] + \beta_1) \\
&+ (1 - E[A_{Wi-Fi}]) \times ((NS_{3G|Wi-Fi} - 1) \times E[T_{NS}] + \beta_2) \\
&\text{where, } NS_{3G|Wi-Fi} = \\
&\quad \left[\frac{BD}{(E[R_{3G}] \times E[T_{3G}]) + (E[R_{Wi-Fi}] \times E[T_{Wi-Fi}])} \right] \quad (3.12)
\end{aligned}$$

$E[R_{3G}] \times E[T_{3G}] + E[R_{Wi-Fi}] \times E[T_{Wi-Fi}]$ 는 한 네트워크 사이클에서 3G와

Wi-Fi를 이용하여 전송할 수 있는 총 데이터 전송량을 의미한다. 수식 3.12에서 β_1 과 β_2 는 각각 마지막 네트워크 사이클에서 데이터를 전송할 때 소요되는 시간을 의미한다. 마지막 네트워크 사이클에서는 남은 데이터 전송량에 따라서 3G만 사용될 수도 있고, Wi-Fi만 사용될 수도 있고, 3G와 Wi-Fi 모두 사용될 수 있다.

마지막 네트워크 사이클에서 데이터 전송에 소요되는 시간인 β_1 과 β_2 는 각각의 경우에 따라 수식 3.13과 3.14와 같이 모델링하여 계산할 수 있다. β_1 은 네트워크 사이클이 Wi-Fi와 3G 순서로 구성된 경우의 마지막 네트워크 사이클에서의 데이터 전송 소요 시간을 나타내고, β_2 는 네트워크 사이클이 3G와 Wi-Fi 순서로 구성된 경우의 마지막 네트워크 사이클에서의 데이터 전송 소요 시간이다. 수식 3.13과 3.14에서, RD 는 마지막 네트워크 사이클에서 전송해야 하는 남은 데이터의 양을 의미한다. 수식 3.13과 3.14에서와 같이, 마지막 네트워크 사이클에서 전송해야 하는 데이터의 양 (RD)이 마지막 네트워크 사이클에서 사용되는 첫번째 네트워크로 전송할 수 있는 데이터의 양보다 큰 경우에는 나머지 데이터를 전송하기 위해 3G와 Wi-Fi 모두가 사용된다.

$$\begin{aligned}
 \text{if } \left[\frac{RD}{(E[R_{Wi-Fi}] \times E[T_{Wi-Fi}])} \right] &\geq 1 \\
 \text{then } \beta_1 &= E[T_{Wi-Fi}] + \frac{RD - (E[R_{Wi-Fi}] \times E[T_{Wi-Fi}])}{E[R_{3G}]} \\
 \text{else } \beta_1 &= \frac{RD}{E[R_{Wi-Fi}]} \\
 \text{where,} \\
 RD &= BD - (NS_{3G|Wi-Fi} - 1) \times \\
 &\quad (E[R_{3G}] \times E[T_{3G}] + E[R_{Wi-Fi}] \times E[T_{Wi-Fi}])
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned}
& \text{if } \left| \frac{RD}{(E[R_{3G}] \times E[T_{3G}])} \right| \geq 1 \\
& \quad \text{then } \beta_2 = E[T_{3G}] + \frac{RD - (E[R_{3G}] \times E[T_{3G}])}{E[R_{Wi-Fi}]} \\
& \quad \text{else } \beta_2 = \frac{RD}{E[R_{3G}]} \\
& \quad \text{where,} \\
& \quad \quad RD = BD - (NS_{3G|Wi-Fi} - 1) \times \quad (3.14) \\
& \quad \quad \quad (E[R_{3G}] \times E[T_{3G}] + E[R_{Wi-Fi}] \times E[T_{Wi-Fi}])
\end{aligned}$$

3.2 무선 네트워크 인터페이스 선택 주기에 따른 비용 분석

모바일 장치가 데이터를 전송할 때, 모바일 장치가 소모하는 에너지 소모량은 요청되는 데이터 전송량, 네트워크 통신 환경, 사용자의 이동성, 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기와 같은 다양한 요소에 영향을 받아 변하게 된다.

본 절에서는 수식 3.2에 기반하여 모바일 장치의 에너지 소모량을 분석한다. 에너지 소모량 분석에서는 에너지 소모량 모델링에서 사용된 $E[AR]$, λ_{Wi-Fi} , μ_{Wi-Fi} , δ_{NIS} 와 같은 값을 변화시키면서 에너지 소모량의 변화를 분석한다. 에너지 소모량 분석을 통해 데이터 전송시 모바일 장치의 에너지 소모량을 최소화 할 수 있는 최적의 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기가 존재한다는 것을 보여주기 위해 특정 네트워크 환경을 반영할 수 있는 임의의 λ_{Wi-Fi} 와 μ_{Wi-Fi} 를 사용하여 에너지 소모량을 분석한다.

모바일 장치의 에너지 소모량을 분석하기 위해서는 3G와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스의 데이터 전송시 에너지 소모량 모델이 필요하다. 실제 3G와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스의 에너지 소모량을 측정하여 사용 가능 하지만 모바일 장치에 부착된 3G와 Wi-Fi 네트워크 통신을 위한 실제 하드웨어 마다 서로 다른 값을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 기존에 제안된 에너지 모델을 이용한다. 3G와 Wi-Fi를 이용하여 데이터를 통신할 때 발생하는 에너지 측면의 비용을 모델링한 연구들이 다수 존재한다 [BBV09, WM10, Bal07]. 본 에너지 소모량 분석에서는 [BBV09]에서 모델링된 3G와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스의 에너지 비용 모델을 기반으로 에너지

소모량을 분석한다. [BBV09]에서 제안된 에너지 비용 모델에 기반하여 표 3.4와 같이 에너지 비용을 설정한다.

항목	설정 값
e_{3G}	28.5 J/MB
e_{Wi-Fi}	12.9 J/MB
e_{NIS}	5.9 J/동작

표 3.4: 에너지 소모량 분석을 위한 파라미터와 그 설정 값

표 3.4와 같이 e_{3G} 는 28.5 J/MB, e_{Wi-Fi} 는 12.9 J/MB로 설정하였다. 표 3.4에서 확인할 수 있듯이, 3G가 Wi-Fi에 비해 약 2배 이상의 에너지를 소모한다. 또한, 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 비용은 5.9 J/동작 이다. 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 비용에는 Wi-Fi 네트워크 탐지 (Scanning) 비용, Wi-Fi 네트워크 연결 설정 (Connection Establishment) 비용을 포함한다.

실제 네트워크 통신 환경에서의 3G와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스의 단위 에너지 소모량과 데이터 전송 속도는 다양한 요소의 영향을 받아 변한다. 실제로 네트워크의 신호의 세기 (RSSI, Received Signal Strength Indication), 네트워크를 공유하는 사용자 수와 같은 요소에 의해 실제 에너지 소모량과 유효 데이터 전송 속도는 달라진다. 표 3.5는 802.11b와 802.11g의 RSSI에 따른 Wi-Fi 네트워크의 최대 데이터 전송 속도의 예를 보여준다. 신호의 세기는 거리에 따라 감소하며 이러한 감쇄의 정도를 예측할 수 있는 다양한 모델이 존재한다. 대표적인 경로 손실 모델 (Path Loss Model) 로는 장거리 경로 손실 (Long-distance Path Loss Model) 모델, 투-레이 그라운드 리플렉션 모델 (Two-ray Ground Reflection Model) 등이 있다.

RSSI	전송 속도
-94 dBm	1 Mb/s (802.11b)
-91 dBm	2 Mb/s (802.11b)
-89 dBm	5.5 Mb/s (802.11b), 6 Mb/s (802.11g)
-82 dBm	11 Mb/s (802.11b), 12 Mb/s (802.11g)
-77 dBm	24 Mb/s (802.11g)
-73 dBm	36 Mb/s (802.11g)
-71 dBm	54 Mb/s (802.11g)

표 3.5: 802.11b와 802.11g의 RSSI에 따른 데이터 전송 속도의 예

모바일 장치의 데이터 전송시 소요되는 단위 에너지 소모량을 CPU 사용과

같은 추가적인 비용을 제외하고 각 네트워크 인터페이스의 순수 전송 전력 소모량만을 고려한다고 가정하면 다음과 같이 모델링할 수 있다. 이때 $R_{3G}(LQ_{3G})$ 와 $R_{Wi-Fi}(LQ_{Wi-Fi})$ 는 현재 네트워크 링크 품질(Link Quality)에 따른 3G와 Wi-Fi 네트워크의 유효 전송 속도 (단위: bit/초)를 의미한다. TX_{3G} 와 TX_{Wi-Fi} 는 각각 3G와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스의 송신 전력 (Transmitter Power, 단위: mW)을 의미한다.

- $e_{3G} = \frac{TX_{3G}}{R_{3G}(LQ_{3G})}$
- $e_{Wi-Fi} = \frac{TX_{Wi-Fi}}{R_{Wi-Fi}(LQ_{Wi-Fi})}$

표 3.6은 실제 3G와 Wi-Fi 네트워크 장치 (NIC, Network Interface Card)의 송신 및 수신 전력의 예를 보여준다. 따라서 Wi-Fi를 이용하여 데이터를 전송할 때, 유효 데이터 전송 속도가 3G 보다 작다면 실제 에너지 소모량은 Wi-Fi가 3G 보다 클 수 있다. 하지만 일반적인 상황에서는 Wi-Fi의 에너지 소모량이 3G보다 작다 [BBV09].

각 3G와 Wi-Fi 네트워크를 공유하여 사용하는 사용자의 수를 고려하지 않는다면, 3G와 Wi-Fi의 링크 품질에 따른 데이터 전송 속도는 다음과 같이 모델링 될 수 있다. 또한 각 3G와 Wi-Fi의 데이터 전송 속도는 링크 품질과 링크 품질에 따라 사용되는 변조 (Modulation) 및 복조 (Demodulation) 방식에 의해서도 달라진다.

- $R_{3G} = R_{3G}(LQ_{3G})$
- $R_{Wi-Fi} = R_{Wi-Fi}(LQ_{Wi-Fi})$

종류	송신 전력	수신 전력	모델명
3G (HSPA)	≤ 251.2 mW	-	HP hs3110/3114 HSPA+ Mobile Module
Wi-Fi (802.11g)	≤ 312.6 mW	≤ 400 mW	XG-622H mPCI WLAN Module

표 3.6: 3G와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스의 실제 송신 및 수신 전력의 예

3.2.1 에너지 소모량 분석

3.2.1.1 요청된 데이터 전송량에 따른 에너지 소모량 분석

그림 3.6은 평균적인 데이터 전송 요청량의 기대값 (EAR , Expected Amount of the Requested data transfer)과 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기 (δ_{NIS})에 따른 모바일 장치의 에너지 소모량을 보여준다. 그림 3.6의 에너지 소모량은 λ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{60}$, μ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{40}$ 일 때의 소모량이다. λ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{60}$, μ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{40}$ 일 때는, 한 네트워크 사이클에서 최적의 경우 기대되는 3G와 Wi-Fi의 평균 사용 시간이 각각 60초와 40초라는 것을 의미한다. 따라서 이때의 Wi-Fi의 가용성 (Availability)은 0.4이다.

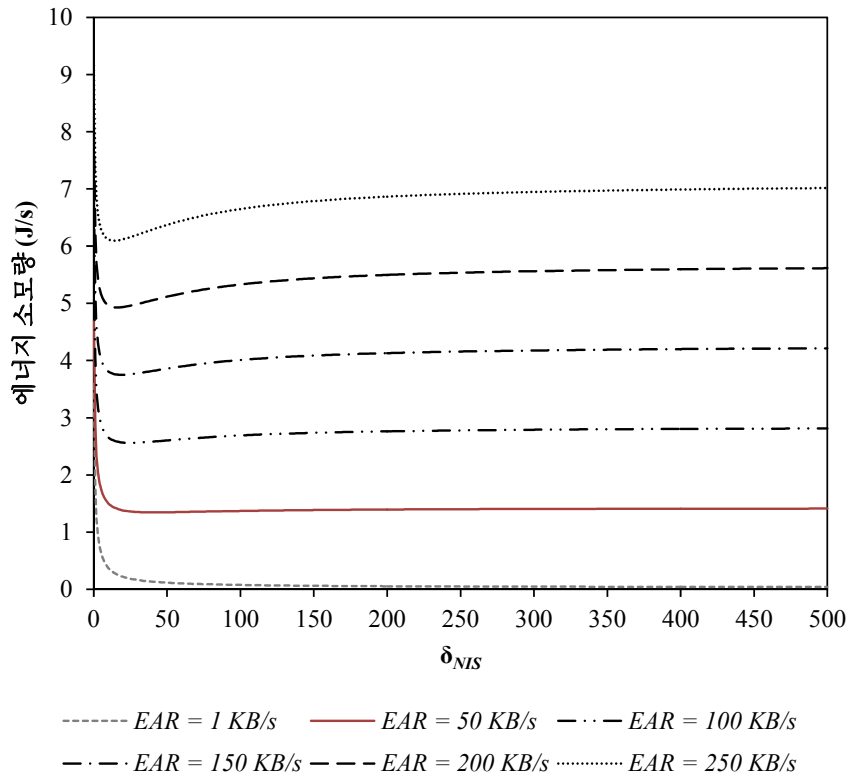


그림 3.6: 평균 데이터 전송 요청량(EAR)과 탐지 및 선택 주기 (δ_{NIS})에 따른 에너지 소모량 ($\lambda_{Wi-Fi} = \frac{1}{60}$, $\mu_{Wi-Fi} = \frac{1}{40}$)

그림 3.6에서 확인 할 수 있듯이 에너지 소모량은 평균 데이터 전송 요청량 (EAR)이 증가함에 따라 전체적으로 증가하고 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택

주기 (δ_{NIS})에 따라 에너지 소모량이 변한다. 그림 3.6에서 에너지 소모량을 최소화하는 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기가 존재함을 확인할 수 있다. 예를 들어 EAR 이 100 KB/s 인 경우, 에너지 소모량을 최적화하는 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기는 약 26 초가 된다. 즉, 다른 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기를 사용하는 것 보다 Wi-Fi 네트워크의 환경 변화가 λ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{60}$, μ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{40}$ 인 경우에는 최적의 선택 및 탐지 주기인 26 초 주기로 무선 네트워크 인터페이스를 탐지 및 선택하는 것이 에너지 효율 측면에서 최적임을 의미한다. EAR 이 250 KB/s 인 경우, 최적의 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기는 약 15초 이다.

그림 3.6에서 추가로 확인 할 수 있는 내용은, 요청되는 데이터 전송량이 증가할 수록 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기가 짧아지는 것을 확인 할 수 있는데, 이는 요청되는 데이터 전송량이 증가할수록 3G를 사용하는 것이 Wi-Fi를 사용하는 것 보다 에너지 소비량이 더 크게 증가하므로 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기를 더 짧게하여 Wi-Fi를 탐지할 확률을 높여 Wi-Fi 네트워크 인터페이스를 통해 데이터를 전송하는 것이 더 효율적이기 때문이다.

그림 3.6의 에너지 소모량 분석 결과를 통해 EAR 이 크면 상대적으로 짧은 주기를 사용하여 네트워크 인터페이스를 탐지하고 선택하는 것이 바람직하고 EAR 이 작으면 상대적으로 긴 주기를 사용하는 것이 에너지 소모량 측면에서 효율적이라는 결론을 얻을 수 있다. 예외적으로 EAR 이 1 KB/s 와 같이, 평균 데이터 전송 요청량이 극히 작은 경우에는 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 비용이 데이터 전송시 발생하는 비용과 비교했을 때 상대적으로 매우 크기 때문에 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지를 수행하지 않고 3G 만을 이용하여 데이터를 전송하는 것이 에너지 소비 효율 측면에서 바람직하다라는 직관적인 내용을 재확인 할 수 있다.

따라서, 데이터 전송시 소모되는 모바일 장치의 에너지 소모량의 초소화하기 위해서는 네트워크 환경에 따라 에너지 소모량을 최적화할 수 있는 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기를 사용해야 한다. 이때 모바일 장치의 에너지 소모량을 최소화할 수 있는 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기는 수식 3.15를 통해 선택 할 수 있다.

$$\delta_{Optimal_NIS} = \underset{\delta_{NIS}}{\operatorname{argmin}} TC_{Device} \quad (3.15)$$

3.2.1.2 Wi-Fi 가용성 (Availability) 에 따른 에너지 소모량 분석

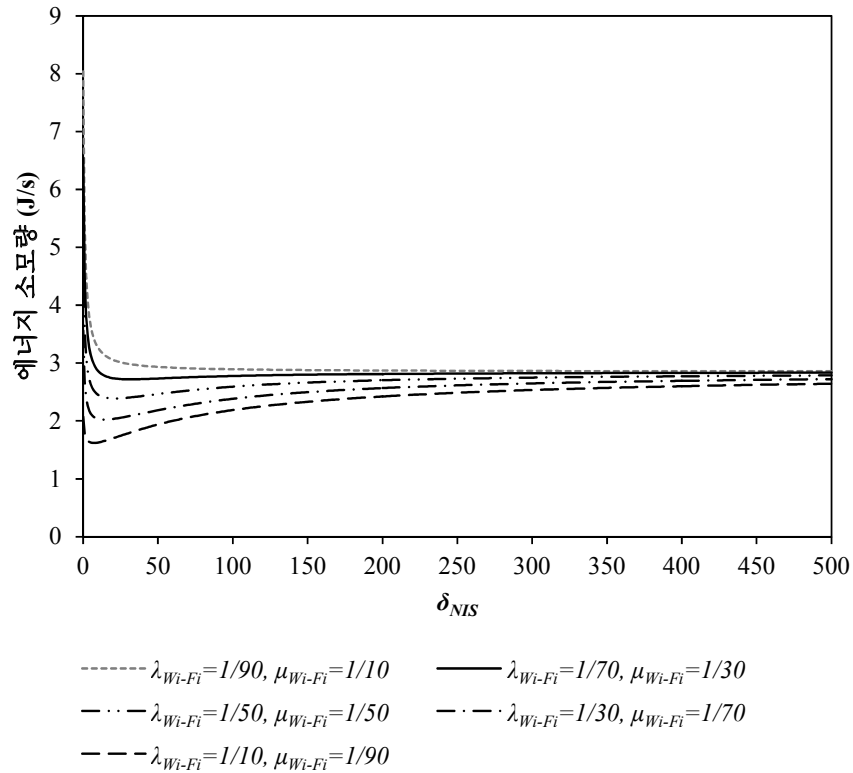


그림 3.7: λ_{Wi-Fi} , μ_{Wi-Fi} , δ_{NIS} 에 따른 에너지 소모량 ($EAR = 100KB/s$)

그림 3.7은 EAR 이 $100 KB/s$ 일때의 λ_{Wi-Fi} , μ_{Wi-Fi} , δ_{NIS} 에 따른 모바일 장치의 에너지 소모량을 보여준다. 이 결과는 Wi-Fi의 가용성에 따른 에너지 소모량 분석을 의미한다. 예를 들어, λ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{90}$ 이고 μ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{10}$ 인 경우에는 한 네트워크 사이클에서 최적의 경우 3G와 Wi-Fi의 평균 사용 기대시간이 각각 90 초, 10 초 인 경우를 의미하고, 따라서 Wi-Fi의 가용성이 0.1인 경우를 의미한다. 이와 동일하게 λ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{10}$ 이고 μ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{90}$ 인 경우에는 한 네트워크 사이클에서 최적의 경우 3G와 Wi-Fi의 평균 사용 기대시간이 각각 10 초, 90 초 인 경우를 의미하므로, Wi-Fi의 가용성이 상대적으로 큰 0.9 인 경우이다.

그림 3.7에서 λ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{30}$ 이고 μ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{70}$ 인 경우, 모바일 장치의 에너지 소모를 최소화 하는 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기는 약 34초 정도이다. 이보다 Wi-Fi의 가용성이 큰 λ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{10}$ 이고 μ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{90}$ 인 경우의 최적의

선택 및 탐지 주기는 약 9초 정도이다. 얻어진 결과를 통해, Wi-Fi의 가용성이 큰 경우는 짧은 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기를 사용하는 것이 바람직하고, Wi-Fi의 가용성이 작은 경우에는 보다 긴 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기를 사용하는 것이 효율적이다라는 결과를 얻을 수 있다. 이는 매우 직관적인 사실의 재확인으로 생각할 수 있다. Wi-Fi의 가용성이 낮을 경우, 대부분의 무선 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지의 결과가 실패일 확률이 크므로 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택을 이용하여 Wi-Fi 네트워크를 통해 데이터를 전송하는 효율성이 떨어지기 때문이다.

3.2.1.3 사용자의 이동성에 따른 에너지 소모량 분석

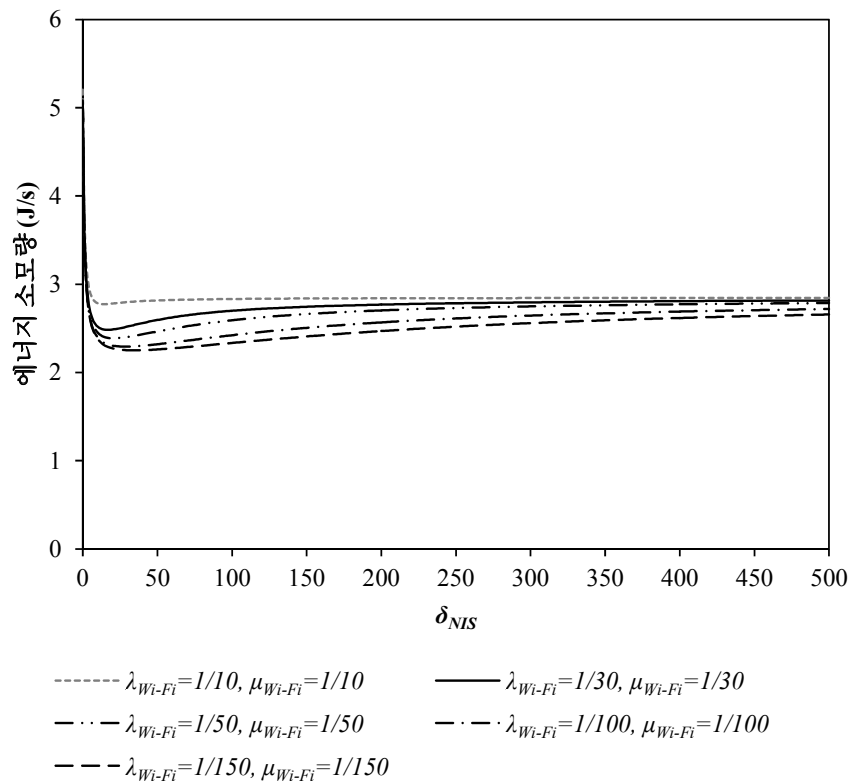


그림 3.8: λ_{Wi-Fi} , μ_{Wi-Fi} , δ_{NIS} 에 따른 에너지 소모량 ($EAR = 100KB/s$)

그림 3.8은 사용자의 이동성에 따른 에너지 소모량을 보여준다. 그림 3.8에서는 λ_{Wi-Fi} 와 μ_{Wi-Fi} 값이 서로 동일하여 Wi-Fi의 가용성은 모두 0.5로 모두 동일한

경우를 의미한다. 하지만, λ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{10}$ 이고 μ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{10}$ 인 경우에는 한 네트워크 사이클에서 최적의 경우 3G와 Wi-Fi의 평균 사용 시간이 각각 10초인 경우를 가정하는 것이고 한 네트워크 사이클의 주기가 짧으므로 사용자의 이동성이 큰 경우를 의미한다고 볼 수 있다. 이와는 반대로 λ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{150}$ 이고 μ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{150}$ 인 경우에는 한 네트워크 사이클에서 최적의 경우 3G와 Wi-Fi의 평균 사용 시간이 각각 150초인 경우를 의미하므로 사용자의 이동성이 상대적으로 작은 경우라고 할 수 있다.

그림 3.8의 사용자의 이동성에 따른 에너지 소모량 분석 결과에 의하면, 사용자의 이동성이 증가할수록 에너지 소모량을 최소화하는 최적의 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기가 짧아지는 경향을 보인다. 이는 사용자의 이동성이 작을때는 네트워크 환경이 변할 확률이 상대적으로 작으므로 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기를 길게 하는 것이 에너지 효율성 측면에서 더 바람직함을 의미한다. 그림 3.8의 에너지 소모량에서 확인 할 수 있듯이, λ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{30}$ 이고 μ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{30}$ 인 경우, 최적의 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기는 약 19초 정도이며, 이보다 사용자의 이동성이 작은 λ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{150}$ 이고 μ_{Wi-Fi} 가 $\frac{1}{150}$ 인 경우, 최적의 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기는 약 38초 이다.

3.2.2 데이터 전송 지연 시간 분석

본 절에서는 요청되는 데이터 전송량에 따른 데이터 전송 소요 시간을 기반으로 데이터 전송 지연 시간을 분석한다. 데이터 전송 지연 시간 분석에는 앞서 모델링한 3G 만을 사용하는 경우, Wi-Fi 만을 사용하는 경우, 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 경우의 네트워크 인터페이스 사용 방법에 대하여 분석을 진행한다.

그림 3.9와 3.10은 데이터 전송 요청량에 따른 각 네트워크 인터페이스 사용 기법들의 데이터 전송 소요 시간을 보여준다. 그림 3.9의 경우, $E[T_{3G}]$ 가 60초 이고 $E[T_{Wi-Fi}]$ 가 40초 이므로 한 네트워크 사이클이 100초인 네트워크 환경이 반복되는 경우이다. 따라서 그림 3.9의 경우에는 Wi-Fi의 가용성이 0.4인 경우를 의미하고, 이와 동일하게 그림 3.10의 경우 Wi-Fi의 가용성이 0.2인 경우를 의미한다. Wi-Fi의 가용성이 클수록 데이터 전송시 소요되는 데이터 전송 시간이 감소하여 데이터 전송 지연 시간 또한 감소함을 그림 3.9와 그림 3.10을 통해 알 수 있다.

그림 3.9와 그림 3.10에서 각각의 네트워크 인터페이스 사용 기법을 비교하여 확인 할 수 있듯이, 3G 만을 사용하여 데이터를 전송하는 방법 (3G Only) 을 사용

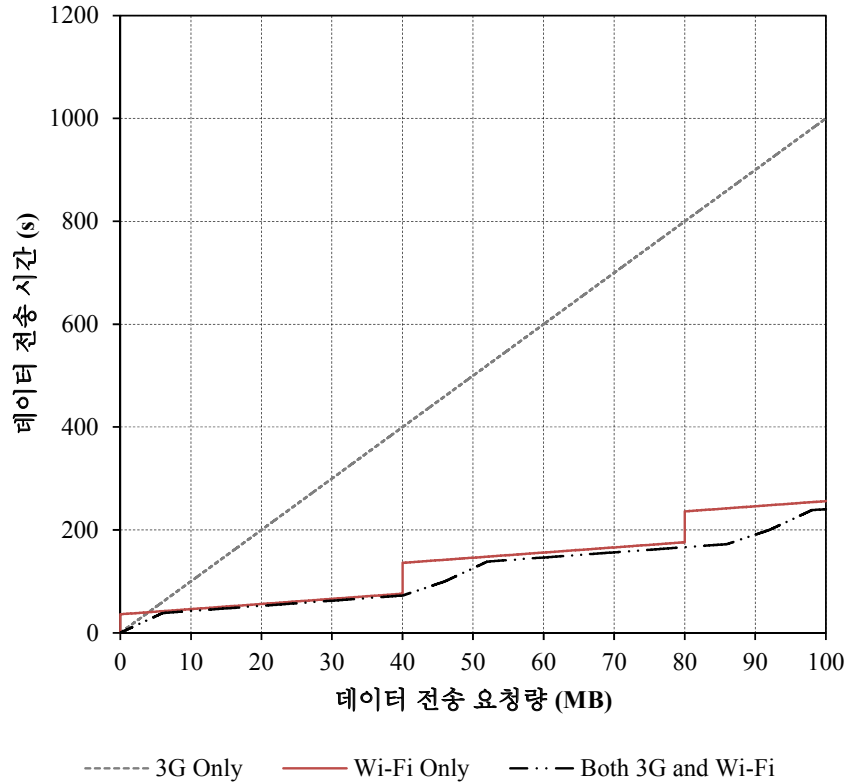


그림 3.9: 데이터 전송 요청량에 따른 데이터 전송 소요 시간(I) ($E[T_{3G}] = 60초$, $E[T_{Wi-Fi}] = 40초$, $E[R_{3G}] = 0.1MB/초$, $E[R_{Wi-Fi}] = 1.0MB/초$)

하는 경우에는 데이터 전송 소요 시간이 선형적으로 (Linearly) 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Wi-Fi 만을 사용하는 방법 (Wi-Fi Only) 을 사용하는 경우에는 데이터 전송시 Wi-Fi만을 사용하고 Wi-Fi 네트워크는 항상 사용할 수 없으므로 데이터 전송 소요 시간이 계단 형태로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 방법 (Both 3G and Wi-Fi) 의 경우에는 최소의 데이터 전송 시간을 보이며 데이터 전송 지연 시간 측면에서 가장 효율적이다. 하지만 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하므로 에너지 소모량은 다른 방법에 비해 증가한다.

서비스 지역이 작은 경우와 같이 Wi-Fi의 가용성이 작은 경우에는 비교적 긴 주기를 사용하여 네트워크 인터페이스를 선택 및 탐지하는 것이 효율적이고, 사용자의 이동성이 큰 경우에는 비교적 짧은 주기를 사용하여 네트워크 인터페이스를 탐지 및 선택하는 것이 효율적이었다.

기호	의미
$E[\lambda_{Wi-Fi}]$	Wi-Fi가 사용 불가능 상태에서 사용 가능 상태로 전이할 상태 전이률 (State Transition Rate) 기대값
$E[\mu_{Wi-Fi}]$	Wi-Fi가 사용 가능 상태에서 사용 불가능 상태로 전이할 상태 전이률 (State Transition Rate) 기대값
$\delta_{Initial}$	초기 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기 (초)
δ_{New}	최신의 네트워크 환경을 고려한 새로운 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기 (초)
$T_{3G}[t]$	t 번째 네트워크 사이클에서의 실제 3G 사용시간 (초)
$T_{Wi-Fi}[t]$	t 번째 네트워크 사이클에서의 실제 Wi-Fi 사용시간 (초)
$AR[t]$	t 번째 네트워크 사이클에서의 평균 데이터 전송 요청량 (MB/s)
$E[T_{3G}[t]]$	t 번째 네트워크 사이클에서의 3G 사용 시간 기대값 (초)
$E[T_{Wi-Fi}[t]]$	t 번째 네트워크 사이클에서의 Wi-Fi 사용 시간 기대값 (초)
$E[AR[t]]$	t 번째 네트워크 사이클에서의 평균 데이터 전송 요청량 기대값 (MB/s)
α	최신 네트워크 사이클에서 얻어진 정보의 반영 비율 (상관 계수), ($0 < \alpha \leq 1$)

표 3.7: 제안 기법의 설명을 위해 사용된 기호와 그 의미

본 절에서는 네트워크 통신 환경을 고려하여 동적 주기를 이용하여 네트워크 인터페이스를 탐지하고 선택하는 효율적인 무선 네트워크 인터페이스 선택 알고리즘 (AWNIS, Adaptive Wireless Network Interface Selection) 을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 각 네트워크 사이클에서 측정할 수 있는 3G와 Wi-Fi의 사용시간을 이용하여 다음 네트워크 사이클에서의 각 3G와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스의 사용 시간 기대값을 계산한다. 얻어진 다음 네트워크 사이클에서의 사용 시간 기대값을 이용하여 현재 네트워크의 통신 환경의 변화율을 근사화하고 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기를 동적으로 조절한다. 이때 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기는 앞 절에서 제안한 에너지 소비 모델에 기반하여 예측된 네트워크 환경에서 에너지 소모량을 최소화 할 수 있는 주기로 선택한다.

제안 기법은 3G 만을 사용하는 경우, Wi-Fi 만을 사용하는 경우, 3G와 Wi-Fi

를 모두 사용하는 경우와 같은 네트워크 인터페이스 선택 기법과 결합하여 사용될 수 있다. 제안 기법은 아래와 같이 세가지 단계에서 수행되는 각각의 알고리즘으로 구성된다.

- 무선 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 단계
- 3G에서 Wi-Fi로의 네트워크 연결 전환 단계
- Wi-Fi에서 3G로의 네트워크 연결 전환 단계

표 3.7는 제안 기법을 설명하기 위해 사용된 기호와 그 의미를 나타낸다.

3.3.1 무선 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 단계

알고리즘 3.1은 제안하는 *AWNIS*가 무선 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 단계에서의 동작 과정을 보여준다. 무선 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기는 초기값인 $\delta_{Initial}$ 로 설정되고, 설정된 네트워크 탐지 및 선택 주기마다 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지를 수행한다. 따라서 *AWNIS*는 현재 설정된 무선 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기 (δ_{NIS}) 마다 알고리즘 3.1의 동작을 수행한다.

알고리즘 3.1과 같이 *AWNIS*는 현재 설정된 매 주기마다 에너지 효율적인 Wi-Fi 무선 네트워크 인터페이스를 선택하기 위해서 Wi-Fi 탐지 (Scanning) 동작을 수행한다. 만약, Wi-Fi 탐지 동작을 통해 3G보다 좀 더 데이터 전송 속도와 에너지 소비 측면에서 효율적인 Wi-Fi로 연결이 가능한 경우에는 해당 Wi-Fi 액세스 포인트로 연결을 수행한다. 따라서 Wi-Fi로 네트워크 연결이 변경되는 경우에는 3G에서 Wi-Fi로 핸드오버가 이루어진다. Wi-Fi 탐지 동작이 실패인 경우에는 다음 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기까지 대기한다.

Wi-Fi 탐지 동작 수행시, 일정 수준 이상의 신호 세기를 가지는 Wi-Fi 액세스 포인트를 탐지한 경우에만 네트워크 탐지가 성공이라고 판단하고 네트워크 연결을 전환시키는 방법을 적용할 수 있다. 이러한 추가적인 고려를 통해 Wi-Fi 액세스 포인트로부터의 신호 세기가 약해 빈번히 Wi-Fi 네트워크 연결이 끊어지는 문제를 줄일 수 있고 네트워크 사이클이 자주 전환되어 빈번한 네트워크 탐지 및 선택 동작이 발생하는 문제를 완화할 수 있다.

알고리즘 3.1 무선 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 단계에서의 *AWNIS* 동작

- 1: Wi-Fi 네트워크 상태 확인 (Checking)
 - 2: IF (Wi-Fi가 사용 가능한 상태인가?) {
 - 3: 최고 품질의 Wi-Fi 액세스 포인트 (Access Point) 선택
 - 4: 3G에서 Wi-Fi로 네트워크 연결 전환 함수 호출
 - 5: }
-

3.3.2 3G에서 Wi-Fi로의 네트워크 연결 전환 단계

알고리즘 3.2는 제안하는 *AWNIS*가 3G에서 Wi-Fi로의 네트워크 연결 전환 단계에서의 동작 과정을 보여준다. *AWNIS*는 3G에서 Wi-Fi로 전환될 때, 현재 네트워크 통신 환경에서의 Wi-Fi의 사용 불가능 상태에서 사용 가능 상태로의 상태 전이율을 근사화하는 방법으로 계산하기 위해서 현재 네트워크 사이클에서의 3G 네트워크 사용 시간을 이용하여 Wi-Fi의 사용 불가능 상태에서 사용 가능 상태로의 상태 전이율을 계산한다.

알고리즘 3.2 3G에서 Wi-Fi로의 네트워크 연결 전환 단계에서의 *AWNIS* 동작

t 는 현재 네트워크 사이클, $t+1$ 는 다음 네트워크 사이클을 의미

- 1: $T_{3G}[t]$ 측정
 - 2: $E[T_{3G}[t+1]]$ 갱신 : $E[T_{3G}[t+1]] = \alpha \times T_{3G}[t] + (1 - \alpha) \times E[T_{3G}[t]]$
 - 3: $E[\lambda_{Wi-Fi}]$ 갱신 : $E[\lambda_{Wi-Fi}] = \frac{1}{E[T_{3G}[t+1]]}$
-

알고리즘 3.2와 같이 현재 네트워크 사이클이 t 번째라고 할 때, 실제 3G 사용 시간인 $T_{3G}[t]$ 는 네트워크 연결이 전환 될 때 측정 가능하며, 이 측정된 $T_{3G}[t]$ 를 이용하여, 다음 네트워크 사이클인 $t+1$ 네트워크 사이클에서의 3G 사용 시간 기대값인 $E[T_{3G}[t+1]]$ 을 $\alpha \times T_{3G}[t] + (1 - \alpha) \times E[T_{3G}[t]]$ 의 형태로 계산한다. 따라서 Wi-Fi의 사용 불가능 상태에서 사용 가능 상태로 전이하는 상태 전이를 기대값은 $\frac{1}{E[T_{3G}[t+1]]}$ 형태로 근사화 될 수 있다.

알고리즘 3.2에서 α 는 최신의 네트워크 사이클에서 얻어진 정보를 반영하는 비율이며, α 가 크면 클수록 최신의 네트워크 사이클에서 얻어진 최신의 네트워크 통신 환경 정보를 반영하는 경향성이 커진다.

3.3.3 Wi-Fi에서 3G로의 네트워크 연결 전환 단계

알고리즘 3.3은 제안하는 *AWNIS*가 Wi-Fi에서 3G로의 네트워크 연결 전환 단계에서의 동작 과정을 보여준다. 해당 알고리즘은 현재 연결된 Wi-Fi와의 데이터 통신 연결이 끊어질 때 수행된다. 3G에서 Wi-Fi로 네트워크 연결을 전환하는 단계와 비슷한 동작을 수행한다. *AWNIS*는 Wi-Fi에서 3G로 전환될 때, 현재 네트워크 통신 환경에서의 Wi-Fi의 사용 가능 상태에서 사용 불가능 상태로의 상태 전이율을 근사화하여 계산하기 위해서 현재 네트워크 사이클에서의 Wi-Fi 네트워크 사용 시간을 이용하여 상태 전이율을 계산한다.

알고리즘 3.3 Wi-Fi에서 3G로의 네트워크 연결 전환 단계에서의 *AWNIS* 동작

t 는 현재 네트워크 사이클, $t+1$ 는 다음 네트워크 사이클을 의미

- 1: $T_{Wi-Fi}[t]$ 측정
 - 2: $AR[t]$ 측정
 - 3: $E[T_{Wi-Fi}[t+1]]$ 갱신 : $E[T_{Wi-Fi}[t+1]] = \alpha \times T_{Wi-Fi}[t] + (1 - \alpha) \times E[T_{Wi-Fi}[t]]$
 - 4: $E[AR[t+1]]$ 갱신 : $E[AR[t+1]] = \alpha \times AR[t] + (1 - \alpha) \times E[AR[t]]$
 - 5: $E[\mu_{Wi-Fi}]$ 갱신 : $E[\mu_{Wi-Fi}] = \frac{1}{E[T_{Wi-Fi}[t+1]]}$
 - 6: δ_{New} 계산 : $E[\lambda_{Wi-Fi}]$, $E[\mu_{Wi-Fi}]$, $E[AR[t+1]]$ 을 이용하여 δ_{New} 계산
 - 7: δ_{NIS} 재설정 : $\delta_{NIS} = \delta_{New}$
-

알고리즘 3.3과 같이 현재 네트워크 사이클이 t 번째라고 할 때, 실제 Wi-Fi 사용 시간인 $T_{Wi-Fi}[t]$ 를 측정한다. 측정된 $T_{Wi-Fi}[t]$ 를 이용하여, 다음 네트워크 사이클이 $t+1$ 네트워크 사이클에서의 Wi-Fi 사용 시간 기대값인 $E[T_{Wi-Fi}[t+1]]$ 를 $\alpha \times T_{Wi-Fi}[t] + (1 - \alpha) \times E[T_{Wi-Fi}[t]]$ 의 형태로 계산한다. 따라서 Wi-Fi의 사용 가능 상태에서 사용 불가능 상태로 전이하는 상태 전이율 기대값은 $\frac{1}{E[T_{Wi-Fi}[t+1]]}$ 형태로 근사화 될 수 있다. 또한 다음 네트워크 사이클에서 사용할 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기를 계산하기 위해 필요한 정보인 평균 데이터 전송 요청량 기대값을 계산하기 위해, $AR[t]$ 를 측정하고, 다음 네트워크 사이클에서의 평균 데이터 전송 요청량의 기대값을 $\alpha \times AR[t] + (1 - \alpha) \times E[AR[t]]$ 의 형태로 계산한다. 얻어진, $E[\lambda_{Wi-Fi}]$, $E[\mu_{Wi-Fi}]$, $E[AR[t+1]]$ 을 이용하여 수식 3.15를 기반으로 다음 네트워크 사이클 ($t+1$)에서 사용할 모바일 장치의 에너지 소모량을 최소화 할 수

있는 새로운 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기(δ_{New})를 계산하고 주기를 새로 설정한다.

동일하게, α 는 최신의 네트워크 사이클에서 얻어진 정보를 반영하는 비율이며, α 가 크면 클수록 최신의 네트워크 사이클에서 얻어진 최신의 네트워크 통신 환경 정보를 반영하는 경향성이 커진다.

3.3.4 AWNIS의 동작의 예

제안한 AWNIS는 설정되는 α 의 값에 따라 성능이 달라지게 된다. 앞에서 언급했듯이, α 가 클수록 최신의 네트워크 통신 환경을 반영하는 경향성이 커진다. α 가 1로 설정되는 경우에는 가장 최근의 네트워크 사이클에서 얻어지는 정보만을 이용하여 새로운 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기를 재설정한다. 직관적으로 이 경우에는 평균적인 네트워크 통신 환경이 반영이 되지 않아 AWNIS의 성능상 문제가 발생할 수 있음을 예측할 수 있다. 이와 반대로 α 가 0에 가까울수록 평균적인 네트워크 통신 환경을 반영하게 된다. 네트워크 통신 환경의 변화에 따라 네트워크 탐지 및 선택 주기를 조절하는 문제와 별도로 α 를 네트워크 환경에 따라 동적으로 조절하는 문제도 매우 어려운 문제이다. 따라서 본 논문에서는 평균적으로 AWNIS의 성능을 최대화할 수 있는 고정값을 설정하여 사용한다. α 를 설정하는 문제는 성능평가 부분에서 자세히 언급하도록 한다.

현재 네트워크 사이클이 t 번째라고 할 때, α 에 따라 제안한 AWNIS의 동작과 정의 예는 다음과 같다. 현재 t 번째 네트워크 사이클에서의 $E[AR[t]]$ 가 0.1 MB/s, $E[T_{3G}[t]]$ 가 100 초, $E[T_{Wi-Fi}[t]]$ 가 100 초라고 하자. 만약 t 번째 네트워크 사이클에서 측정된 $T_{3G}[t]$, $T_{Wi-Fi}[t]$, $AR[t]$ 가 각각 50 초, 50 초, 0.05 MB/s 이고 α 가 0.1인 경우, $E[T_{3G}[t+1]]$, $E[T_{Wi-Fi}[t+1]]$, $E[AR[t+1]]$ 는 알고리즘에 의해 각각 95 초, 95 초, 0.095 MB/s가 된다. α 가 1인 경우에는, $E[T_{3G}[t+1]]$, $E[T_{Wi-Fi}[t+1]]$, $E[AR[t+1]]$ 가 각각 50 초, 50 초, 0.05 MB/s가 된다.

따라서 $E[\lambda_{Wi-Fi}]$ 와 $E[\mu_{Wi-Fi}]$ 는, α 가 0.1일 때, $\frac{1}{95}$, $\frac{1}{95}$ 로 예측되고, α 가 1일 때는, $\frac{1}{50}$, $\frac{1}{50}$ 으로 각각 예측 된다. 이 예측된 $E[\lambda_{Wi-Fi}]$ 와 $E[\mu_{Wi-Fi}]$ 과 $E[AR[t+1]]$ 를 기반으로 다음 주기에서 사용할 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기 δ_{New} 는 수식 3.15를 이용하여 α 가 0.1일 때, 30 초로 계산되고, α 가 1일 때, 33 초로 계산되어 다음 네트워크 사이클에서 사용할 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기로

사용한다.

이와 같은 동작이 반복되고 3G와 Wi-Fi의 실제 사용시간을 이용하여 Wi-Fi 네트워크의 가용률을 근사화하는 방식으로 네트워크 환경의 변화에 따라 무선 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기를 조절한다.

3.4 에너지 효율적인 무선 네트워크 인터페이스 선택 알고리즘 분석

제안한 *AWNIS*의 성능을 시뮬레이션으로 분석하기에 앞서 에너지 효율적인 무선 네트워크 인터페이스 선택 알고리즘을 단순한 네트워크 변화에 따라 그 성능을 평균 에너지 소모량과 데이터 전송 소요 시간 측면에서 분석한다.

분석을 진행하기 위해 3G와 Wi-Fi의 네트워크의 실제 사용 가능한 시간이 두 개의 사이클을 주기로 반복적으로 변하는 네트워크 환경을 임의로 가정한다. 예를 들어 “ $3G|Wi-Fi = 100|100$ ”은 한 네트워크 사이클에서 3G와 Wi-Fi의 실제 네트워크 사용가능 시간이 각각 100초, 100초 임을 의미한다. 따라서 “ $3G|Wi-Fi = 100|100$ ” - “ $3G|Wi-Fi = 50|50$ ”은 “ $3G|Wi-Fi = 100|100$ ”인 네트워크 사이클과 “ $3G|Wi-Fi = 50|50$ ”인 네트워크 사이클이 두 개의 네트워크 사이클을 주기로 각각 한 번씩 연속적으로 반복됨을 의미한다. 이와 같은 네트워크 환경의 변화는 그림 3.11과 같이 표현될 수 있다. 또한 초기 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기는 30 초로 설정하여 분석한다. 이러한 설정과 가정을 기반으로 앞서 설명한 *AWNIS*의 동작을 에뮬레이션 (Emulation)하여 에너지 소모량과 데이터 전송 지연 시간 측면에서 성능을 분석한다.

3.4.1 에너지 소모량 측면 분석

그림 3.12는 α 와 다양한 형태로 네트워크 환경이 변하는 경우의 에너지 소모량을 보여준다. 이때 평균 데이터 전송 요청량은 100 KB/s이고, $E[R_{3G}]$ 는 0.1 MB/s, $E[R_{Wi-Fi}]$ 는 1.0 MB/s로 설정되었을 경우의 결과이다. 그림 3.12에서와 같이 3G만 사용하는 네트워크 사용 기법을 사용할 경우에는 비교적 큰 에너지 소모량을

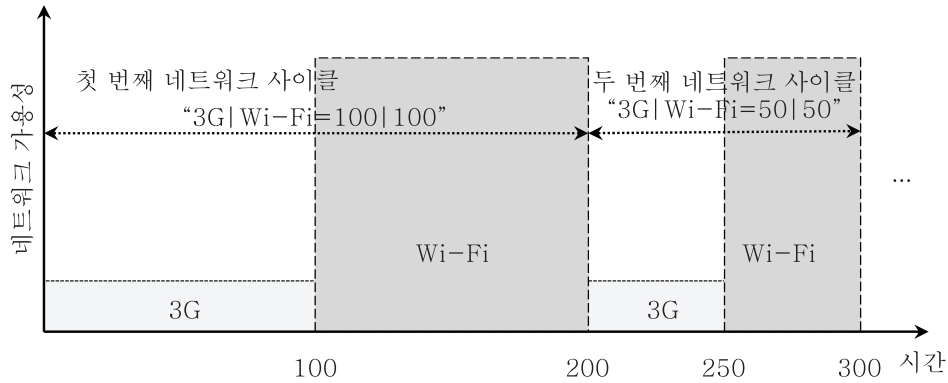


그림 3.11: “3G|Wi-Fi=100|100” - “3G|Wi-Fi=50|50”의 네트워크 환경 변화의 예

보인다. 반면, 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하고 제안한 *AWNIS*를 적용하여 네트워크 인터페이스를 선택하는 경우에는 에너지 소모량을 줄일 수 있음을 확인 할 수 있다.

이때 설정된 α 에 따라 *AWNIS*의 성능에 차이를 보이지만, 일반적으로 α 가 0.1로 설정 되었을 때 에너지 소모량이 최소인 것을 확인 할 수 있다. 이는 최신의 네트워크 사이클에서 얻어진 최신의 정보를 주로 반영하는 것이 아니라, 이전의 네트워크 사이클에서 얻어진 정보도 가중치를 주어 전체적인 네트워크 환경을 고려하여 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기를 조절하는 것이 바람직함을 보여준다.

3.4.2 데이터 전송 지연 시간 측면 분석

그림 3.13은 α 와 단순한 주기로 네트워크 환경이 변할 때의 데이터 전송 소요 시간을 보여준다. 이때 평균 데이터 전송 요청량은 100 KB/s이고, $E[R_{3G}]$ 는 0.1 MB/s, $E[R_{Wi-Fi}]$ 는 1.0 MB/s으로 설정되었을 경우의 결과이다.

그림 3.13에서와 같이 3G만 사용하는 네트워크 사용 기법을 사용할 경우에는 설정된 α 에 상관없이 일정한 데이터 전송 소요 시간을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이와는 다르게 *AWNIS*를 기반으로 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 경우에는 설정된 α 에 따라 *AWNIS*는 서로 다른 성능을 보이지만, 전체적으로 데이터 전송에 소요되는 전송 시간이 줄어들어 데이터 전송 지연 시간을 효과적으로 줄일 수 있음을

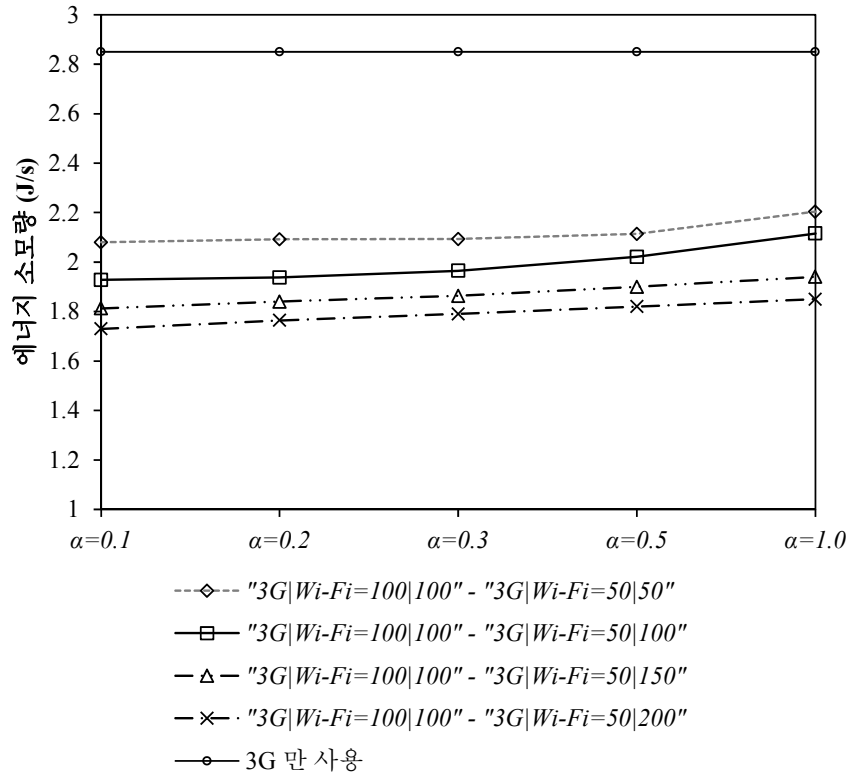


그림 3.12: α 에 따른 AWNIS의 에너지 소모량($EAR = 100KB/s$, $E[R_{3G}] = 0.1MB/초$, $E[R_{Wi-Fi}] = 1.0MB/초$)

확인할 수 있다.

그림 3.12와 유사하게 설정된 α 에 따라 데이터 전송 지연 시간의 성능에 차이를 보이지만, 일반적으로 α 가 0.1로 설정 되었을 때 데이터 전송시 소요되는 전송 시간이 최소값을 가져 데이터 전송 지연 시간 측면에서 성능이 최적임을 알 수 있다.

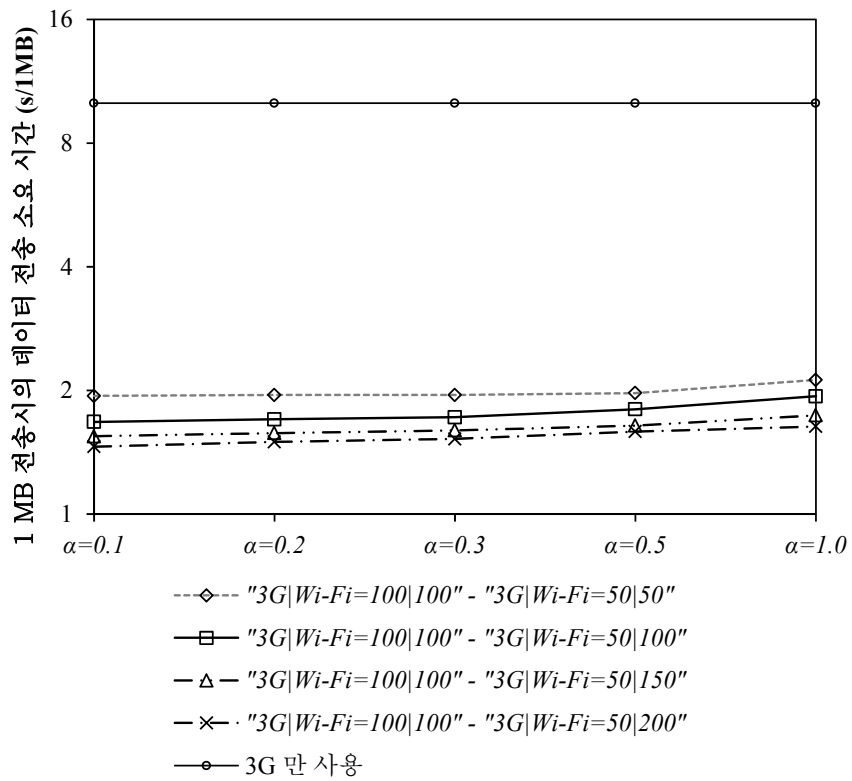


그림 3.13: α 에 따른 AWNIS의 데이터 전송 소요 시간 ($EAR = 100KB/s$, $E[R_{3G}] = 0.1MB/초$, $E[R_{Wi-Fi}] = 1.0MB/초$)

제 4 장 성능 분석 및 비교

본 장에서는 *AWNIS*의 성능을 분석하기 위한 시뮬레이션 환경과 *AWNIS*의 성능을 비교 분석하기 위한 대상 네트워크 인터페이스 선택 기법들에 대해서 서술한다. 또한 다양한 데이터 전송 워크로드를 이용한 시뮬레이션을 통해 제안한 *AWNIS*의 성능을 모바일 장치의 에너지 소모량과 데이터 전송 지연 시간 측면에서 분석하고 비교한다.

4.1 시뮬레이션 환경

그림 4.1은 시뮬레이션에서 사용된 네트워크 환경 구성의 예를 보여준다. 그림 4.1과 같이 네트워크 영역 (Network Field)은 Wi-Fi 사용 가능 지역 (Wi-Fi Service Area)과 3G 사용 가능 지역 (3G Service Area)으로 나뉜다. 3G 사용 가능 지역은 전체 네트워크 영역이고 Wi-Fi 사용 가능 지역은 전체 네트워크 영역 중 일부 영역으로 제한된다. 이는 일반적인 실제 3G와 Wi-Fi 네트워크 서비스 영역의 구성과 유사하다. 3G 네트워크 서비스 영역은 하나의 3G 기지국 (Base station)에 의해 서비스될 수 있는 네트워크 환경으로 가정한다. 3G 기지국은 네트워크 필드의 중앙에 위치한다고 가정한다. 이와 같은 네트워크 환경에서 3G와 Wi-Fi 무선 네트워크 인터페이스를 가지는 모바일 장치를 이용하는 사용자는 네트워크 영역을 자유롭게 이동하면서 데이터 통신을 수행한다. 사용자의 이동성 모델은 임의 방향 (Random Direction) 모델을 사용한다.

3G와 Wi-Fi의 수직 핸드오버 (Vertical Handover)는 IEEE 802.21에서 정의된 3G와 Wi-Fi 간의 MIH (Media Independent Handover) 기술과 모바일 IP (Mobile IP) 기술의 적용으로 수직 핸드오버가 가능한 상황을 가정한다. 이때 3G와 Wi-Fi의 수직 핸드오버에 소요되는 에너지 소모량과 핸드오버에 의한 데이터 전송 지연 시간은 고려하지 않는다. 제안한 *AWNIS*는 MIH 계층에 그림 4.2와 같은 형태로 적용될 수 있다.

이러한 시뮬레이션 환경에서 모바일 장치의 평균 에너지 소비량과 평균 데이터

전송 소요 시간을 측정하기 위해 시뮬레이션을 각각 100 회 수행하고 그 평균값을 이용하였다.

표 4.1은 시뮬레이션에 사용된 주 파라미터들과 그 값을 나타낸다.

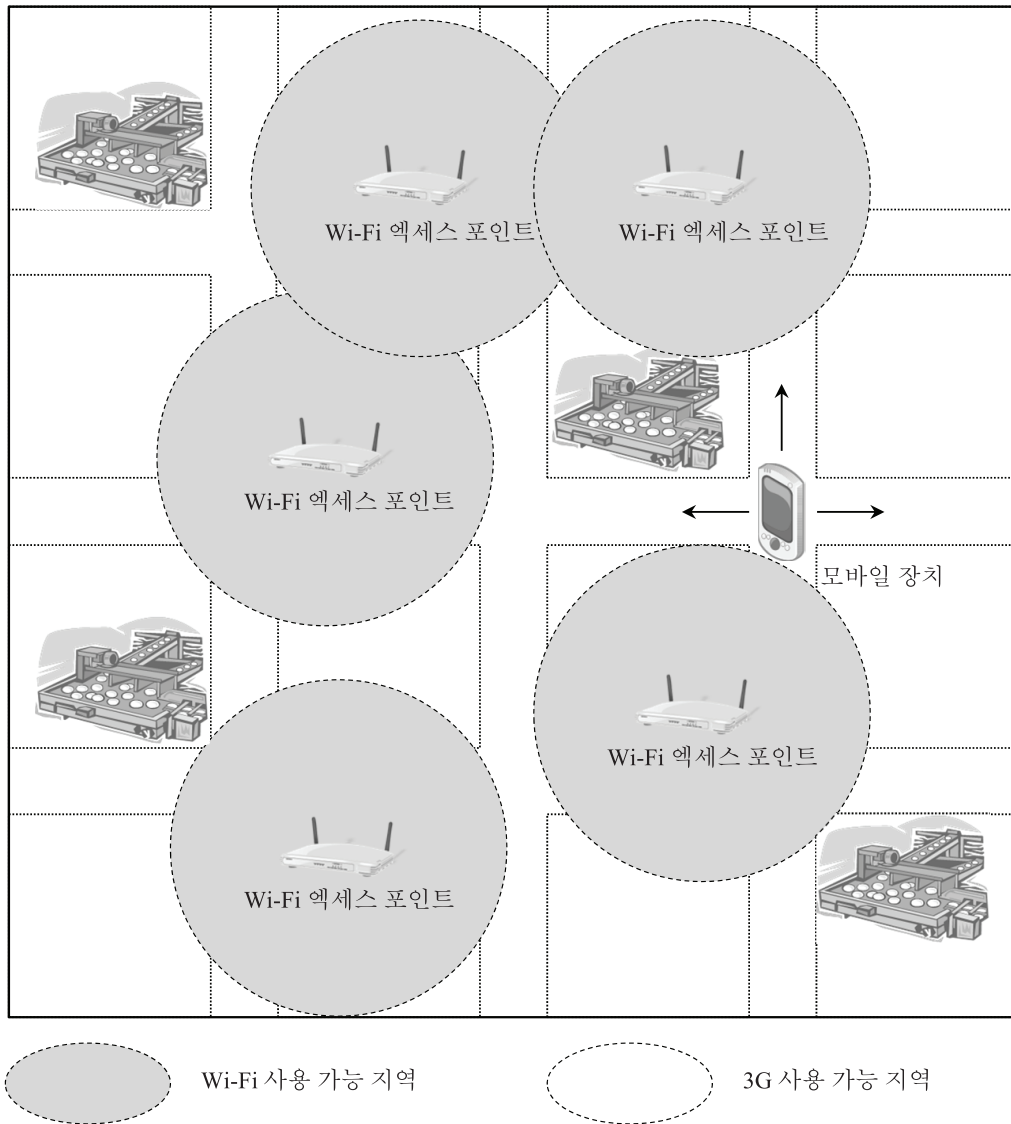


그림 4.1: 시뮬레이션을 위한 네트워크 환경의 예

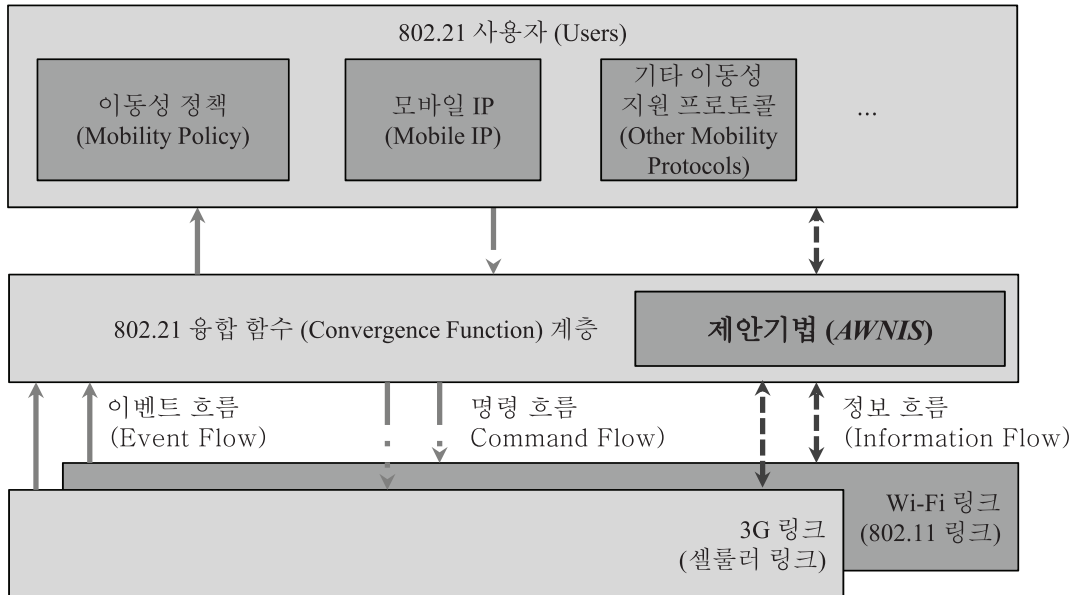


그림 4.2: 제안한 AWNIS의 적용 예

4.2 성능 분석 및 비교에 사용된 네트워크 선택 기법

3G 네트워크 인터페이스와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스를 가지는 모바일 장치에서 네트워크 인터페이스를 사용하는 방법은 이전에 언급했듯이 크게 다음과 같이 세 가지 사용 방법으로 나눌 수 있다.

- 3G 만을 사용하는 방법
- 3G와 Wi-Fi를 선택적으로 사용하는 방법
- Wi-Fi 만을 사용하는 방법

따라서 3G 네트워크 인터페이스를 주 네트워크로 사용하면서 Wi-Fi 네트워크를 탐지 및 선택하기 위해서 AWNIS를 결합하여 사용하거나 고정 주기로 Wi-Fi 네트워크를 탐지 및 선택할 수 있다. 마지막으로 데이터 전송이 요청될 때마다 네트워크 탐지 및 선택 동작을 수행할 수도 있다. 시뮬레이션을 통한 성능 분석에는 다음과 같은 AWNIS가 적용될 수 있는 네트워크 선택 기법과 주기적인 네트워크 인터

파라미터 명	값
네트워크 필드 크기	1000 m × 1000 m
워크로드 종류	10, 50, 100, 150, 200 KB/s, ECG, RealisticTraffic
3G의 데이터 전송시 에너지 소모량	28.5 J/MB
Wi-Fi의 데이터 전송시 에너지 소모량	12.9 J/MB
네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 비용	5.9 J
초기 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기	30 s
최대 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기	300 s
Wi-Fi	802.11g
3G	HSPA
3G 기지국 (Basestation)의 수	1
3G 기지국 (Basestation)의 서비스 반경	1 Km
Wi-Fi 액세스 포인트 (AP)의 수	10, 15, 20, 25
Wi-Fi 액세스 포인트의 서비스 반경	100 m
사용자 이동 속도	1 m/s - 10 m/s
사용자 이동 모델	임의 방향 모델 (Random Direction Model)

표 4.1: 시뮬레이션 파라미터 (I)

페이스 선택 및 탐지 동작을 수행하지 않으며 데이터를 전송하는 최적의 네트워크 선택 기법을 비교 분석하여 성능 분석을 한다.

4.2.1 AWNIS의 적용이 가능한 네트워크 선택 기법

3G와 Wi-Fi를 이용하여 데이터를 전송할 때는 효율적인 네트워크 인터페이스를 탐지하여 사용하기 위해 고정 주기를 사용하는 경우와 AWNIS를 이용하여 네트워크 환경의 변화에 따라 네트워크 탐지 및 선택에 동적 주기를 사용하는 경우로 나눌 수 있다. 따라서 다음과 같은 총 5가지의 네트워크 선택 기법으로 조합되어 사용될 수 있다. AWNIS의 성능은 다음 5가지의 네트워크 선택 기법들의 에너지 소비량 및 데이터 전송 지연 시간을 비교 및 분석함으로써 평가할 수 있다.

- 3G만을 사용하는 기법 (3G Only)
3G만을 사용하는 기법은 데이터 전송시 3G만을 사용하므로 데이터 전송량이

비교적 작은 응용들에 적합하다. 또한 3G 만을 사용하는 기법은 데이터 전송 지연에 민감하지 않은 응용에 적합하다. 하지만, 3G의 경우 단위 시간당 에너지 소모량이 크므로 대용량의 데이터를 전송하는 네트워크 응용에는 적합하지 않다.

- 고정 주기를 기반으로 *Wi-Fi* 만을 사용하는 기법 (*Wi-Fi w/o AWNIS*)

고정 주기를 기반으로 네트워크 탐지 및 선택 동작을 수행하여 *Wi-Fi* 만을 사용하여 데이터를 전송하는 경우에는, 3G 만을 사용하는 기법과 비교할 때 에너지 소모량을 줄일 수 있어 에너지 효율성 측면에서 매우 바람직하다. 하지만 *Wi-Fi*의 가용성 (*Availability*)이 작은 경우에는 *Wi-Fi*로 데이터를 전송할 수 있는 시간이나 확율이 줄어들어 데이터 전송 지연 시간이 매우 커질 수 있다. 또한 고정 주기를 사용하므로 설정된 고정 주기에 따라 에너지 소비와 데이터 전송 지연 성능에 차이를 보인다.
- *AWNIS*를 기반으로 *Wi-Fi* 만을 사용하는 기법 (*Wi-Fi w/ AWNIS*)

*AWNIS*를 기반으로 *Wi-Fi* 만을 사용하는 경우에는 고정 주기를 기반으로 *Wi-Fi* 만을 사용하는 기법과 비교할 때, *Wi-Fi*의 가용성에 따라 네트워크 선택 및 탐지 주기를 동적으로 조절하므로 네트워크 선택 및 탐지 동작에 소모되는 에너지 소모량을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 나머지 특성은 고정 주기를 기반으로 *Wi-Fi* 만을 사용하는 기법과 유사하다.
- 고정 주기를 기반으로 3G와 *Wi-Fi*를 모두 사용하는 기법 (*3G|Wi-Fi w/o AWNIS*)

고정 주기를 기반으로 3G와 *Wi-Fi*를 모두 사용하는 기법은 데이터 전송시 3G와 *Wi-Fi*를 모두 사용하므로 데이터 전송 지연 측면에서 *Wi-Fi* 만을 이용하여 데이터를 전송하는 기법들과 비교할때 보다 효율적이다. 하지만, 사용하는 네트워크 선택 및 탐지 주기가 고정되어 있으므로 설정된 고정 주기에 따라 에너지 소비와 데이터 전송 지연 성능에 차이를 보인다.
- *AWNIS*를 기반으로 3G와 *Wi-Fi*를 모두 사용하는 기법(*3G|Wi-Fi w/ AWNIS*)

*AWNIS*를 기반으로 3G와 *Wi-Fi*를 모두 사용하는 기법은 고정 주기를 기반으로 3G와 *Wi-Fi*를 사용하는 기법과 비교할 때, 네트워크 환경 변화를 고려하여 네트워크 선택 및 탐지 주기를 동적으로 조절하므로 네트워크 선택 및 탐지에 사용되는 에너지 소모량을 효율적으로 줄일 수 있어 모바일 장치의

에너지 소비를 줄이면서 데이터 전송 지연을 효율적으로 줄일 수 있다.

4.2.2 최적의 네트워크 선택 기법

*AWNIS*의 성능을 최적 (Optimal)의 네트워크 선택 기법과 비교하기 위해서 3G와 Wi-Fi를 최적으로 사용할 수 있는 최적의 네트워크 선택 기법을 고려한다. 최적의 네트워크 선택 기법은 현실에서는 불가능 하지만, 네트워크 환경의 변화를 완벽하고 정확하게 알 수 있다는 가정하에 정의한다. 즉, 에너지 효율성 측면과 데이터 전송 속도 측면에서 효율적인 Wi-Fi를 사용할 때, Wi-Fi 네트워크의 가용 시점 (Available Point, Available Time)을 정확하게 알 수 있어 Wi-Fi 네트워크의 가용 시점에 정확히 Wi-Fi 네트워크를 선택하여 데이터를 전송하는 기법이다. 따라서 주기적인 네트워크 탐지 및 선택 비용이 발생하지 않고, Wi-Fi의 가용 시점에 정확히 Wi-Fi 네트워크를 선택하여 사용하므로 다른 네트워크 선택 기법들과 비교할 때 에너지 소비량 측면과 데이터 전송 지연 시간 측면에서 최적의 성능을 보인다.

최적의 네트워크 선택 기법과 *AWNIS*가 적용된 네트워크 선택 기법을 비교 분석하여 *AWNIS*의 성능을 상대적으로 비교 분석 할 수 있다. 3G와 Wi-Fi를 사용할 때, 앞에서 가정한 것과 같이 Wi-Fi 네트워크를 선택할 수 있다면, 다음과 같은 두 가지의 네트워크 사용 기법을 최적의 네트워크 선택 기법으로 고려하여 성능 비교에 이용할 수 있다.

- *최적의 Wi-Fi 사용 기법 (Wi-Fi Optimal)*

Wi-Fi 만을 이용하여 데이터를 전송하므로 네트워크 환경에 따라 데이터 전송 지연 시간이 매우 크게 증가할 수 있다. 하지만, 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 동작 없이 데이터를 전송하므로 에너지 소비량 측면에서는 가장 효율적인 기법이다.

- *최적의 3G와 Wi-Fi 사용 기법 (3G|Wi-Fi Optimal)*

데이터 전송시 3G와 Wi-Fi를 모두 이용하여 데이터를 전송하므로 일정 수준의 데이터 전송 지연 시간을 보장하면서 에너지 소비량을 효율적으로 줄일 수 있다. 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하므로 데이터 전송 지연 시간이 최소인 기법이다.

4.2.3 비교 가능한 기존의 네트워크 선택 기법

제안된 *AWNIS*의 성능을 최적의 네트워크 선택 기법 이외에 비교 가능한 기존의 네트워크 선택 기법과 비교하기 위해 *Context-For-Wireless* 네트워크 선택 기법을 이용한다. 시뮬레이션에서는 합성 워크로드 뿐만 아니라, *ECG* 워크로드 [RZ07]와 *RealisticTraffic* 워크로드 [ERG10]를 이용하여 성능을 비교 분석한다.

4.3 시뮬레이션 결과 및 분석

4.3.1 α 에 따른 에너지 소모량 및 데이터 전송 지연 분석

*AWNIS*의 성능은 α 의 설정값에 따라 그 성능이 달라질 수 있다. 따라서 본 절에서는 α 에 따른 에너지 소모량 및 데이터 전송 지연 시간의 결과를 비교 분석한다.

그림 4.3과 그림 4.4는 *AWNIS*가 적용된 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 기법 (3G|Wi-Fi w/ *AWNIS*)과 Wi-Fi 만을 사용하는 기법 (Wi-Fi w/ *AWNIS*)의 α 에 따른 에너지 소모량을 보여준다. 이때 Wi-Fi 액세스 포인트의 수는 15, 평균 데이터 요청량은 100 KB/s인 경우의 결과이다. 최적의 네트워크 선택 기법과 비교했을 때, *AWNIS*가 적용된 네트워크 선택 기법 또한 좋은 성능을 보여준다. 그림 4.3에서는 α 가 증가할수록 에너지 소모량이 더 많아지는 경향을 보인다. 그 이유는 네트워크 환경 변화에 맞춰 적절한 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기를 사용하지 못했기 때문이다. α 가 1에 가까울수록 최근 네트워크 사이클에서 얻어지는 정보만 이용하는 경향이 커지게 된다. α 가 1이라면 최신의 한 개의 네트워크 사이클에서 얻어지는 정보만을 이용하여 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기를 계산한다.

이와 반대로 그림 4.4에서 확인할 수 있듯이, *AWNIS*를 적용한 Wi-Fi 만을 사용하는 네트워크 선택 기법의 경우, α 가 증가할수록 소모하는 에너지량이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 시뮬레이션 결과의 이유는 α 가 증가할수록 네트워크 환경 변화에 맞춰 적절한 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기를 사용하지 못해 전체적인 데이터 전송 시간이 줄어들고 수행한 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 수행 횟수가 감소했기 때문이다. 데이터 전송 지연 측면까지 고려한다면, 데이터 전송 소요 시간이 더욱 증가하여 데이터 전송 지연 측면의 효율성은 떨어지게 된다.

그림 4.5와 그림 4.6은 *AWNIS*가 적용된 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 기법과

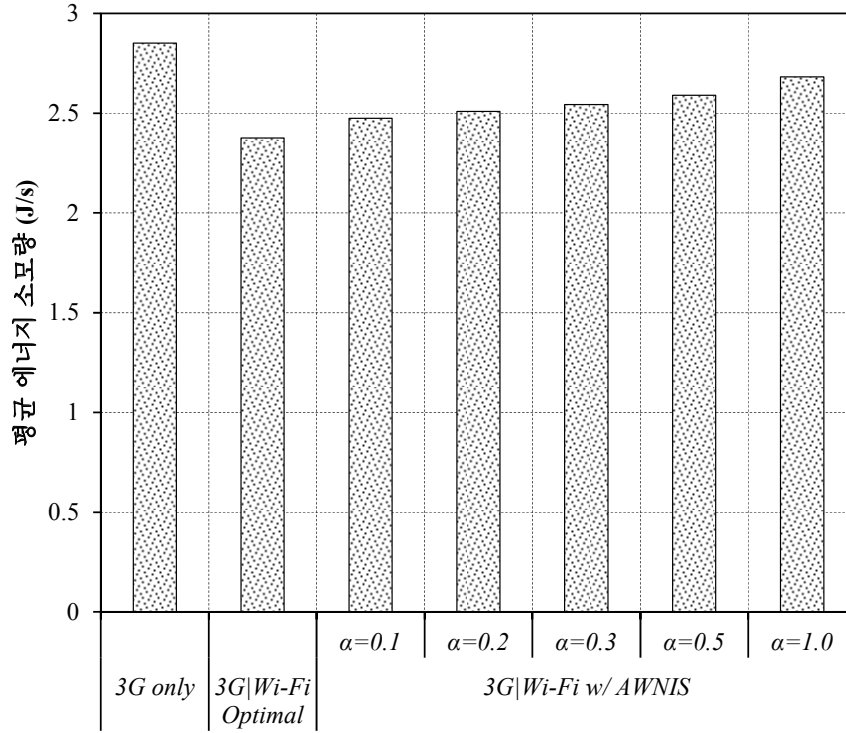


그림 4.3: 3G와 Wi-Fi를 모두 이용하는 기법의 α 따른 에너지 소모량 (AP의 수 = 15, $E_{AR} = 100 \text{ KB/s}$)

Wi-Fi 만을 사용하는 기법에서의 α 에 따른 데이터 전송 소요 시간을 보여준다. 최적의 네트워크 선택 기법과 비교했을 때, AWNIS가 적용된 네트워크 선택 기법 또한 작은 데이터 전송 시간을 보여 데이터 전송 지연 시간을 효과적으로 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그림 4.5와 그림 4.6 모두에서 α 가 증가할수록 전체적인 데이터 전송 시간이 길어져 데이터 전송 지연 시간이 늘어남을 확인 할 수 있다. 또한 데이터 전송 지연 시간을 줄이기 위해서는 3G와 Wi-Fi를 모두 선택적으로 사용하여 데이터를 전송하는 것이 Wi-Fi만을 이용하거나 3G만을 이용하여 데이터를 전송하는 것 보다 데이터 전송 지연 시간 측면에서 효율적이라는 것을 알 수 있다. 따라서 데이터 전송 지연의 허용 특성이 작은 네트워크 응용에서는 AWNIS를 적용하며 일정 수준의 데이터 전송 지연 시간을 보장하면서 모바일 장치의 에너지 소모량을 줄여 에너지 효율성을 높일 수 있다.

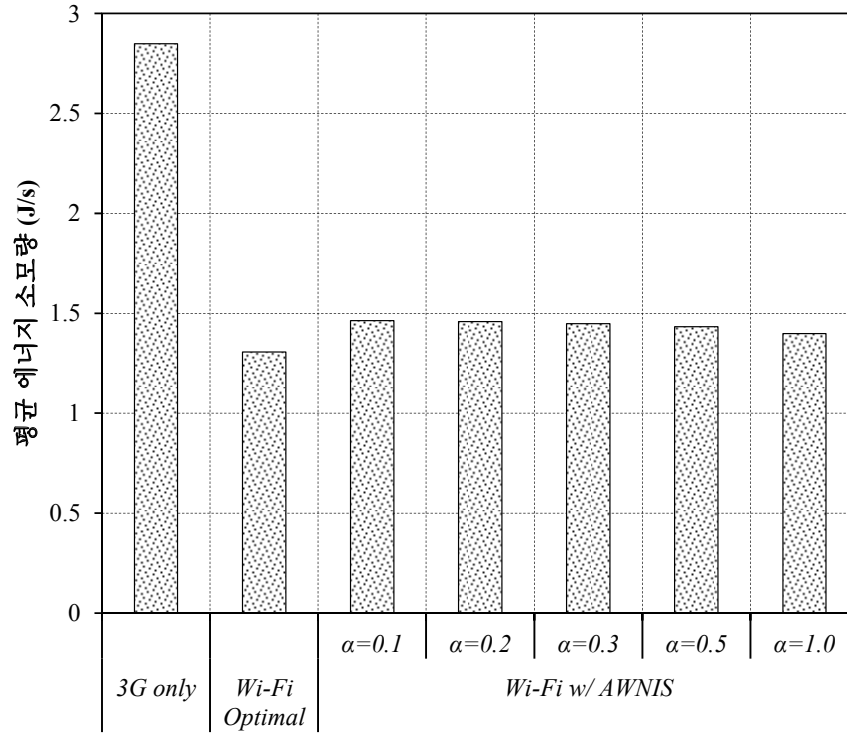


그림 4.4: Wi-Fi 만을 이용하는 기법의 α 따른 에너지 소모량 (AP의 수 = 15, $EAR = 100 KB/s$)

그림 4.3, 4.4, 4.5, 4.6의 시뮬레이션 결과를 종합하면, *AWNIS*가 적용된 네트워크 선택 기법의 에너지 소모량과 데이터 전송 지연 시간 측면의 성능이 α 의 값에 따라 달라지는 것을 확인 할 수 있다. α 가 0.1일 때, 에너지 소모량 및 데이터 전송 지연 시간 측면에서 최고의 성능을 보여주었다. 이는 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기를 계산할 때, 평균적인 네트워크 환경을 반영하는 것이 최신의 네트워크 환경만을 반영하는 것보다 바람직함을 의미한다. 따라서 이후 시뮬레이션에서는 α 의 값을 0.1로 설정하여 시뮬레이션 결과를 얻었고 각각의 결과를 이용하여 *AWNIS*의 성능을 분석하였다.

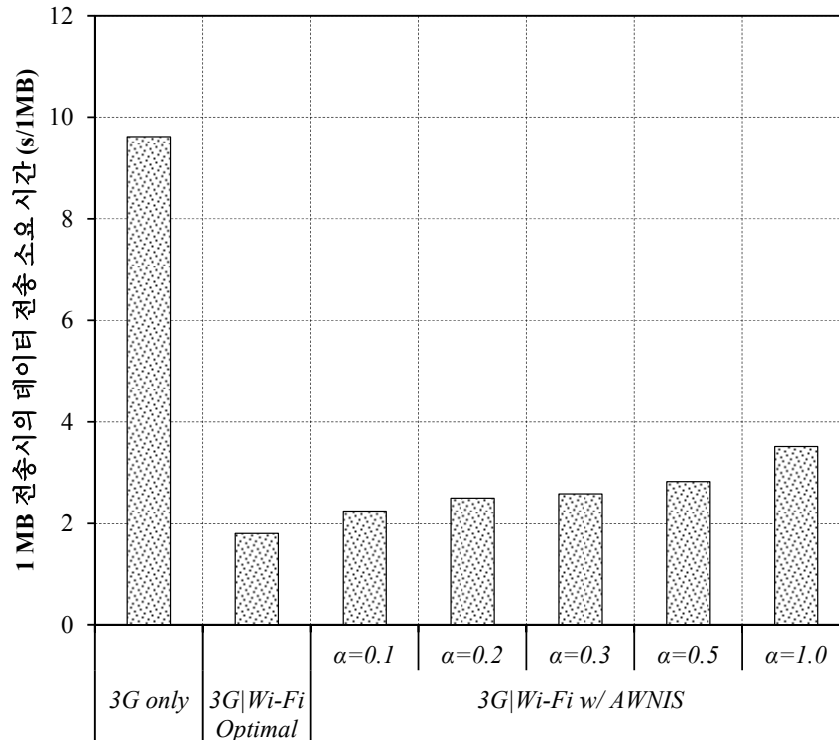


그림 4.5: 3G와 Wi-Fi를 모두 이용하는 기법의 α 따른 데이터 전송 소요 시간 (AP의 수 = 15)

4.3.2 합성 워크로드 (Synthetic Workloads)를 이용한 성능 분석

합성 워크로드를 이용한 성능 분석에서는 다양한 합성 워크로드를 통해서 *AWNIS*의 성능을 에너지 소모량 및 데이터 전송 지연 시간 측면에서 비교 분석한다.

4.3.2.1 에너지 소모량

그림 4.7은 Wi-Fi 액세스 포인트가 15개 일 때, 평균 데이터 전송 요청량에 따른 각 네트워크 인터페이스 선택 기법의 에너지 소모량을 보여준다. 이때 *AWNIS* 사용하지 않는 네트워크 인터페이스 선택 기법을 위한 네트워크 탐지 및 선택 주기는 30초로 설정하였다. 평균 데이터 전송 요청량이 증가할수록 에너지 소모량이 증가하게 되는데 이는 단위 시간당 전송하는 데이터 전송량이 증가하기 때문이다.

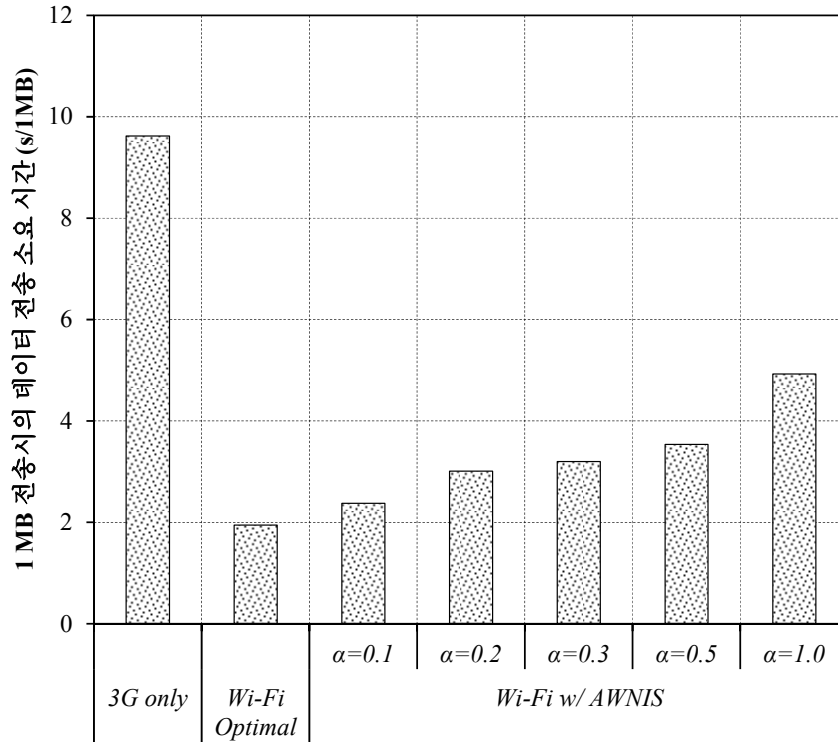


그림 4.6: Wi-Fi 만을 이용하는 기법의 α 따른 데이터 전송 소요 시간 (AP의 수 = 15)

그림 4.7의 결과를 통해 평균 데이터 전송 요청량이 작은 경우에는 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 비용이 더 크기 때문에 이러한 경우에는 3G만을 이용하여 데이터를 전송하는 네트워크 선택 기법이 에너지 소비량 측면에서 효율적임을 알 수 있다. 하지만 평균 데이터 전송 요청량이 비교적 클 경우에는 3G만을 이용하여 데이터를 전송하면 에너지 효율성 측면에서는 바람직하지 않음을 알 수 있다. 이는 평균 데이터 전송량이 증가할수록 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 동작의 효율성이 증가하고 평균 데이터 전송량이 증가할수록 3G만 이용하는 경우의 에너지 소모량이 다른 기법에 비해 더 크게 증가하기 때문이다. AWNIS를 사용하여 3G와 Wi-Fi를 둘다 사용하는 기법 (3G|Wi-Fi w/ AWNIS)과 Wi-Fi 만을 사용하는 기법 (Wi-Fi w/ AWNIS)은 AWNIS를 사용하지 않는 각각의 대응 기법들 (3G|Wi-Fi w/o AWNIS과 Wi-Fi w/o AWNIS)과 비교했을 때 더 작은 에너지를 소모하는

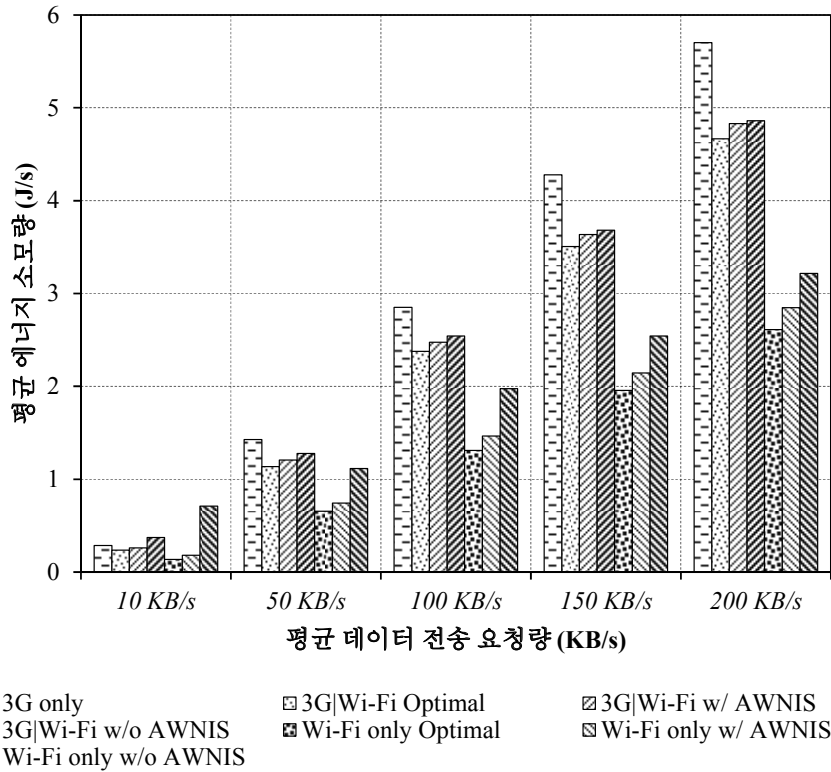


그림 4.7: 평균 데이터 전송 요청량에 따른 에너지 소모량 (AP의 수 = 15, AWNIS를 사용하지 않는 기법의 $\delta_{NIS} = 30$ 초)

것을 확인 할 수 있다.

그림 4.8은 평균 데이터 전송 요청량이 100 KB/s 일 때, Wi-Fi 액세스 포인트 수의 변화에 따른 평균 에너지 소모량을 보여준다. 이때 AWNIS를 사용하지 않는 네트워크 인터페이스 선택 기법을 위한 네트워크 탐지 및 선택 주기는 30 초로 설정하였다. Wi-Fi 액세스 포인트 수가 증가할수록 평균적인 에너지 소모량이 감소하게 되는 결과를 확인 할 수 있다. 이는 Wi-Fi의 전체 서비스 영역에 증가하여 Wi-Fi의 가용성이 커져 3G보다 에너지 효율적인 Wi-Fi를 사용하여 데이터를 전송하는 비율이 점점 증가하기 때문이다.

그림 4.8에서 Wi-Fi의 가용성은 Wi-Fi 액세스 포인트의 수에 따라 변하는데, 액세스 포인트의 수가 10개 일 때에는 전체 네트워크 영역의 약 30%의 영역에서 Wi-Fi의 이용이 가능하고, 액세스 포인트의 수가 25개일 때는 약 80%의 영역에서 Wi-Fi

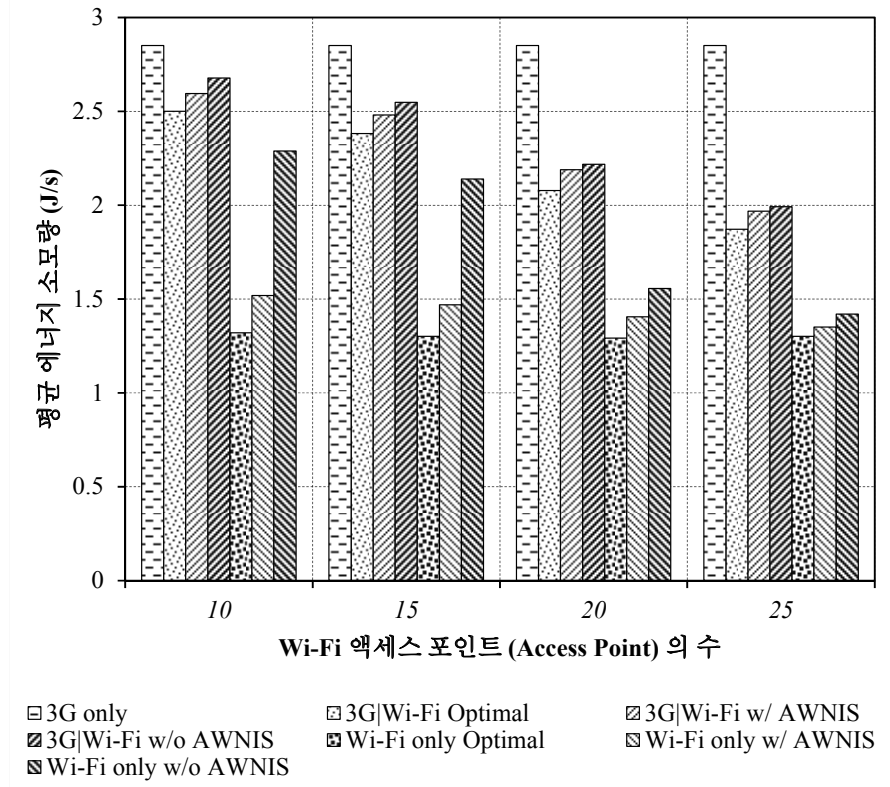


그림 4.8: Wi-Fi 액세스 포인트 수의 변화에 따른 에너지 소모량 (평균 데이터 전송 요청량 = 100 KB/s, *AWNIS*를 사용하지 않는 기법의 $\delta_{NIS} = 30$ 초)

의 이용이 가능하다. 그림 4.7의 에너지 소모량 결과와 유사하게 *AWNIS*를 적용한 네트워크 인터페이스 선택 기법은 *AWNIS*를 적용하지 않은 네트워크 인터페이스 선택 기법보다 더 작은 에너지 소모량을 보인다. 이는 고정주기를 사용하는 것보다 *AWNIS*를 사용하여 동적 주기로 네트워크 인터페이스를 탐지하고 선택하는 것이 더욱 효율적이라는 것을 의미한다.

그림 4.9는 *AWNIS*를 사용하지 않는 네트워크 인터페이스 선택 기법(3G|Wi-Fi w/o *AWNIS*, Wi-Fi w/o *AWNIS*)의 고정된 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기에 따른 에너지 소모량 결과를 보여준다. 이때 평균 데이터 전송 요청량은 100 KB/s이고, Wi-Fi 액세스 포인트 수는 15개 이다.

그림 4.9에서 확인 할 수 있듯이 고정값으로 설정된 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기가 길어질수록 *AWNIS*를 사용하지 않는 네트워크 인터페이스 선택

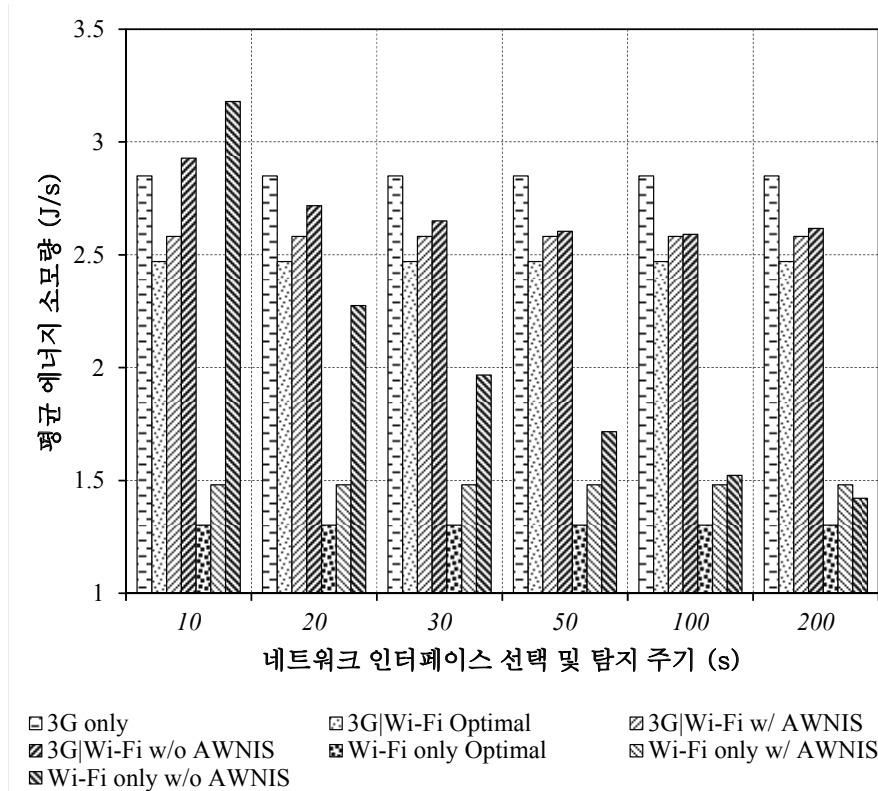


그림 4.9: 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 주기의 변화에 따른 에너지 소모량 (평균 데이터 전송 요청량 = 100 KB/s, AP의 수 = 15)

기법의 에너지 소모량이 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 이는 수행하는 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 수행 횟수의 감소로 인한 에너지 소모량 감소가 큰 영향을 미친다. 또한 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 기법의 경우, 고정 주기가 비교적 긴 100초와 200초의 에너지 소모량을 비교해보면, 또 다시 에너지 소모량이 증가하는 형태를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 이는 Wi-Fi를 사용하여 데이터를 전송하는 시간이 크게 줄어들어 3G 전송에 의한 에너지 소모량이 다시 큰 비율을 차지하게 되기 때문이다. 그림 4.9의 에너지 소모량 결과에서도 고정주기를 사용하는 것보다 변화하는 네트워크 환경을 고려하여 *AWNIS*를 사용하여 네트워크 인터페이스를 탐지하고 선택하는 것이 효율적이라는 것을 확인 할 수 있다.

4.3.2.2 데이터 전송 지연 시간

그림 4.10과 그림 4.11은 각 네트워크 인터페이스 선택기법이 1 MB를 전송하는데 소요된 전송 시간 결과를 보여준다. 그림 4.10은 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 네트워크 선택 기법들의 데이터 전송 소요 시간을 보여주고, 그림 4.11은 Wi-Fi만을 사용하는 네트워크 인터페이스 선택 기법들의 데이터 전송 소요 시간을 보여준다.

그림 4.10과 그림 4.11을 통해 데이터 전송 지연 시간을 최소화 하기 위해서는 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 네트워크 선택 기법이 효과적임을 알 수 있다. *AWNIS*를 사용하지 않는 네트워크 선택 기법의 경우에는 고정값으로 설정된 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기가 증가할수록 데이터 전송 소요 시간이 증가하여 데이터 전송 지연이 증가함을 확인 할 수 있다.

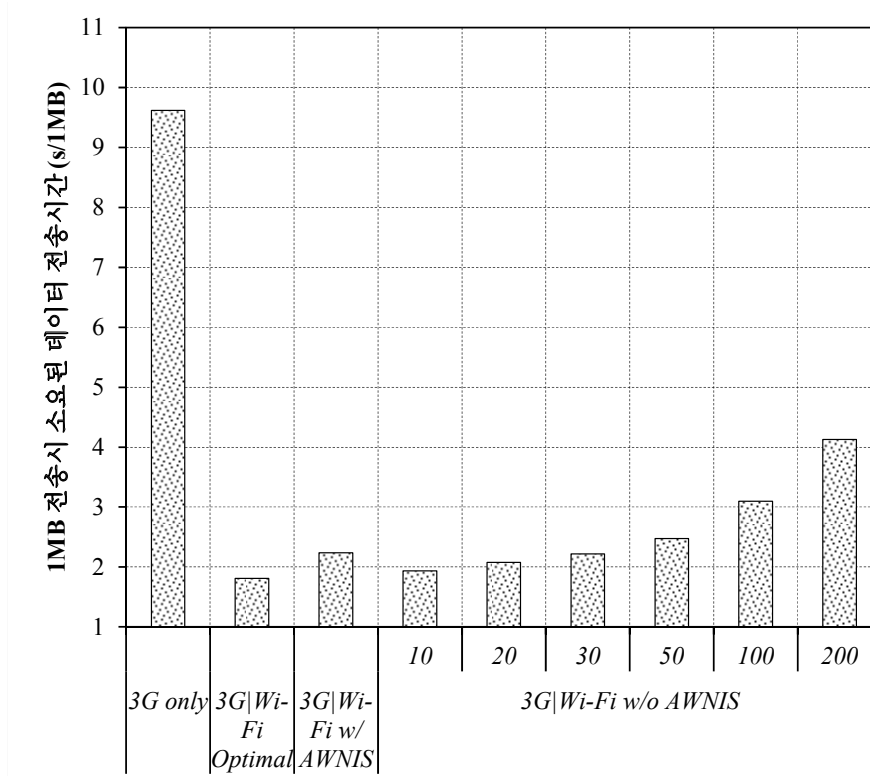


그림 4.10: 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 네트워크 인터페이스 선택 기법의 데이터 전송 소요 시간 (AP의 수 = 15)

그림 4.10과 그림 4.11의 시뮬레이션 결과를 통해 실제 네트워크 환경의 변화

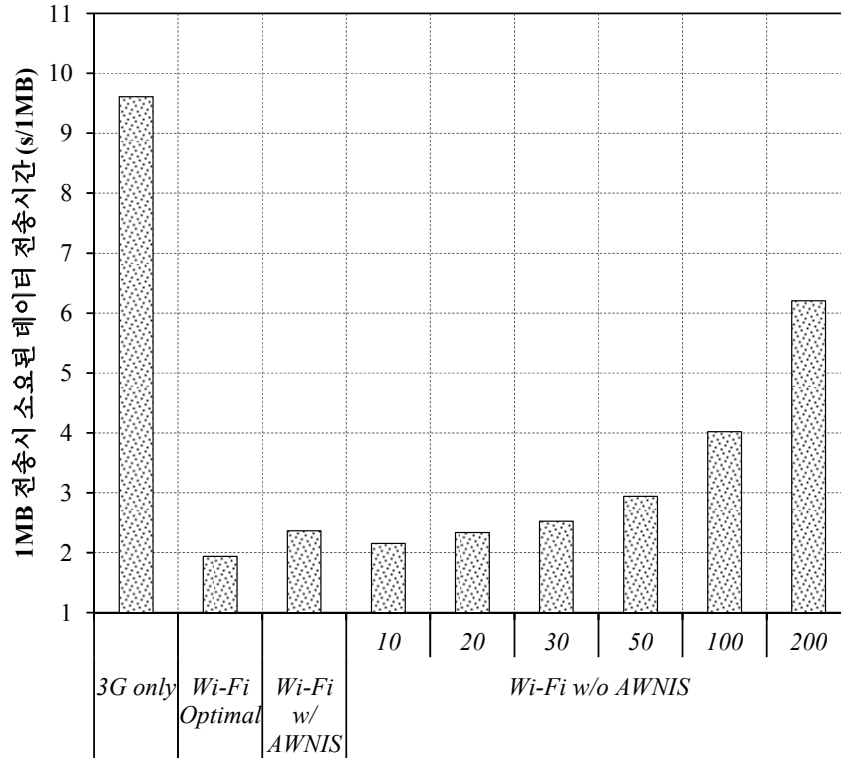


그림 4.11: Wi-Fi만을 사용하는 네트워크 인터페이스 선택 기법의 데이터 전송 소요 시간 (AP의 수 = 15)

와 현재 네트워크 상황을 정확히 알 수 없으므로 고정 주기를 사용하는 네트워크 인터페이스 선택 기법은 매우 바람직하지 않음을 알 수 있다. 반면에, *AWNIS*를 적용한 네트워크 인터페이스 선택 기법들의 경우에는 네트워크 환경의 변화에 따라 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기를 동적으로 조절할 수 있어 효과적으로 데이터 전송 지연 시간을 줄일 수 있음을 확인 할 수 있다.

4.3.3 현실적인 워크로드 (Realistic Workloads)를 이용한 성능 분석

현실적인 워크로드를 이용한 분석에서는 좀 더 일반적인 네트워크 응용의 데이터 전송 워크로드를 대표할 수 있는 워크로드들을 이용하여 *AWNIS*의 성능을 기존에 제안된 네트워크 인터페이스 선택 기법인 *Context-For-Wireless* [RZ07]와 비교 분석한다. 시뮬레이션에 사용된 워크로드는 *ECG* [RZ07]와 *RealisticTraffic* [ERG10]

워크로드이다.

4.3.3.1 ECG 워크로드를 통한 성능 분석

ECG 워크로드는 주기적으로 모바일 장치에서 수집된 정보를 일정 보고 시간마다 서버로 전송하는 비교적 단순한 워크로드이다 [RZ07]. 각각의 데이터는 270 KB의 크기를 가진다. 따라서 ECG 워크로드는 정보를 주기적으로 수집하고 해당 정보를 전송하는 것과 같이 모니터링을 하는 네트워크 응용들을 대표할 수 있는 워크로드이다.

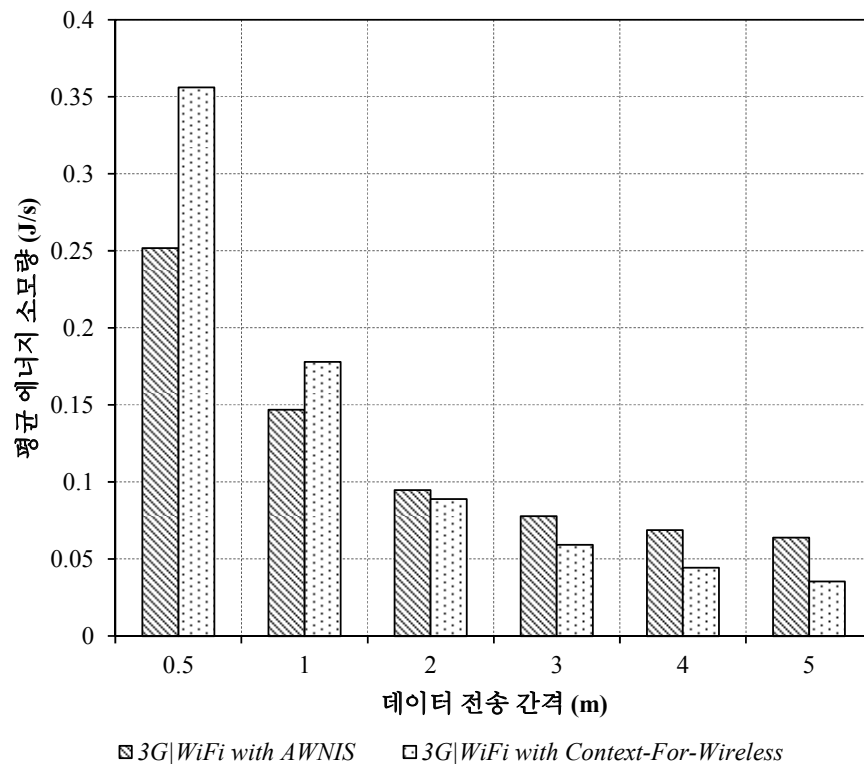


그림 4.12: ECG 워크로드에 의한 평균 에너지 소모량(AP의 수 = 15)

그림 4.12와 표 4.2는 ECG 워크로드를 이용하여 AWNIS와 Context-For-Wireless를 기반으로 3G와 Wi-Fi를 둘 다 이용하는 네트워크 인터페이스 선택 기법의 평균 에너지 소모량과 데이터 전송 소요 시간 결과를 보여준다.

그림 4.12의 평균 에너지 소모량 결과에서 *AWNIS*와 *Context-For-Wireless* 모두 데이터를 전송하는 전송 주기가 길어질수록 평균 에너지 소모량이 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 이는 보고 주기가 길어질 수록 단위 시간당 전송하는 데이터 전송량이 줄어들기 때문에 전체적인 에너지 소모량 또한 감소하게 되기 때문이다.

또한 *Context-For-Wireless*의 평균 에너지 소모량의 감소가 *AWNIS*의 감소량 보다 큰데, 이는 *Context-For-Wireless*는 매 데이터 전송 요청시에만 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지를 진행하기 때문에 데이터 보고 주기가 길어질수록 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 동작에 소요된 에너지 소모량이 감소하기 때문이다. 반면 *AWNIS*의 경우 평균적인 데이터 전송 요청량이 줄어들어 따라 평균적인 에너지 소모량이 감소하지만, 지속적으로 동적 주기를 이용하여 에너지 효율적인 네트워크 인터페이스를 탐지 및 선택하는 동작을 수행하기 때문에 그 감소폭이 *Context-For-Wireless* 보다는 작다. *AWNIS*를 모든 시점에 사용하는 것이 아니라 데이터를 전송하기 전에 동작시키는 방식을 사용하면 에너지 소모량을 개선할 수 있다.

기법	평균 데이터 전송 소요 시간 (ms/KB)
<i>AWNIS</i>	2.33
<i>Context-For-Wireless</i>	4.61

표 4.2: ECG 워크로드에 의한 평균 데이터 전송 소요 시간 (AP의 수 = 15)

표 4.2의 결과를 보면 *AWNIS*가 *Context-For-Wireless* 보다 평균적으로 더 짧은 데이터 전송 시간을 가져 데이터 전송 지연 측면에서 훨씬 더 효율적이라는 것을 알 수 있다. 이는 동적 주기로 에너지 효율적인 Wi-Fi 네트워크의 탐지 및 선택을 진행하여 좀 더 빠른 전송 속도를 지원하는 Wi-Fi 네트워크 인터페이스로 데이터를 전송하는 비율이 커지기 때문이다. 이와는 다르게 *Context-For-Wireless*는 데이터 전송 요청시 결정된 네트워크 인터페이스를 데이터 전송 완료시까지 사용한다.

즉, 데이터 전송량이 작은 경우라도 그 통신 빈도가 높은 네트워크 응용에 *AWNIS*가 매우 적합하며, *AWNIS*를 적용하면 일정 수준의 데이터 전송 지연 시간을 보장하면서 모바일 장치의 에너지 소모를 줄여 에너지 효율성을 증대시킬 수 있다.

4.3.3.2 *RealisticTraffic* 워크로드를 통한 성능 분석

RealisticTraffic 워크로드 [ERG10]는 웹 검색과 같은 데이터 워크로드와 동영상이나 사진 전송과 같은 벌크 데이터 전송 워크로드가 결합된 형태를 갖는다. 이는 일반적으로 모바일 장치를 이용하여 통신하는 사용자의 일반적인 형태와 유사한 형태이다. *RealisticTraffic* 워크로드의 평균적인 데이터 전송 요청 간격 (Average Inter-request Time)은 약 28.3 초 이다. 또한 평균적인 데이터 전송 크기는 1.92 MB 이지만, 대부분의 워크로드는 웹 검색과 관련된 수십 KB의 크기의 작은 데이터 전송 크기를 갖는다.

표 4.3은 *RealisticTraffic* 워크로드를 이용하여 *AWNIS*와 *Context-For-Wireless*를 기반으로 데이터 전송시 3G와 Wi-Fi를 둘 다 사용하는 네트워크 인터페이스 선택 기법의 평균 에너지 소모량과 데이터 전송 소요 시간 결과를 보여준다.

항목	<i>AWNIS</i>	<i>Context-For-Wireless</i>
평균 에너지 소모량(J/s)	1.61	1.57
평균 데이터 전송 소요 시간 (ms/KB)	2.45	5.52

표 4.3: *RealisticTraffic* 워크로드에 의한 평균 에너지 소모량 및 데이터 전송 소요 시간 (AP의 수 = 15)

표 4.3의 결과에 의하면 *AWNIS*가 *Context-For-Wireless*에 비해 더 많은 에너지를 소모하는 것을 알 수 있다. 이는 동적주기를 이용한 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 비용에 의한 것이라고 할 수 있다. 또한 대부분의 데이터 전송 요청이 대용량의 데이터를 전송하는 데이터 전송 요청이 아닌 수십 KB 이내의 웹과 관련된 데이터 전송 요청이기 때문이다. 벌크 데이터 전송 요청의 비율이 커질수록 *AWNIS*가 *Context-For-Wireless* 보다 이점을 가진다. 표 4.3에서 확인 할 수 있듯이 *AWNIS*가 *Context-For-Wireless*에 비해 약 2.54% 정도의 에너지를 더 소모하지만, 이 소모량의 차이는 큰 수준의 에너지 소모량 차이라고 보기 어렵다. 표 4.2와 동일하게 *AWNIS*가 *Context-For-Wireless* 보다 더 짧은 데이터 전송 시간을 가져 데이터 전송 지연 측면에서 훨씬 더 효율적이라는 것을 알 수 있다.

모든 시뮬레이션 결과와 그 분석을 통해 *AWNIS* 기법을 기존의 네트워크 인터페이스 선택 기법에 적용하여 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택에 사용하면 일정

수준의 데이터 전송 지연시간을 보장하면서 모바일 기기의 에너지 소모량을 최소화 할 수 있음을 확인하였다. 따라서 *AWNIS*는 데이터 전송 지연 시간에 민감한 보안과 관련된 데이터 전송 응용에 매우 적합하다.

4.4 *AWNIS* 알고리즘 개선 및 성능 분석

실제 네트워크 환경에서는 각 네트워크의 유효 데이터 전송 속도와 각 네트워크 인터페이스의 단위 에너지 소모량은 무선 링크 품질이나 각 네트워크를 공유하는 사용자의 수와 같은 다양한 요소에 따라 변한다. 그림 4.13은 표 3.6의 실제 3G와 Wi-Fi 네트워크 인터페이스의 송신 전력 소모량을 기반으로 한 유효 데이터 전송 속도에 따른 3G와 Wi-Fi의 단위 에너지 소모량의 변화를 보여준다. 유효 데이터 전송 속도에 따라 Wi-Fi 보다 3G의 에너지 효율성이 더 높을수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 거리에 따른 무선 링크의 품질과 네트워크를 공유하는 사용자 수에 의한 Wi-Fi 액세스 포인트의 성능 저하 요소를 추가로 반영하여 제안 알고리즘을 개선한다. 이후 개선한 *AWNIS*의 성능을 시뮬레이션을 통해 분석 한다.

4.4.1 개선된 *AWNIS* 알고리즘

유효 데이터 전송 속도에 따른 단위 에너지 소모량을 고려하여 개선한 *AWNIS* 알고리즘은 다음과 같다. 표 4.4는 개선된 *AWNIS* 알고리즘을 설명하기 위한 추가 기호와 그 의미를 나타낸다.

알고리즘 4.1 무선 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 단계에서의 개선된 *AWNIS* 동작

- 1: Wi-Fi 네트워크 상태 확인 (Checking)
 - 2: IF ($RSSI_{TH}$ 보다 신호가 센 Wi-Fi 액세스 포인트가 존재하는가?) {
 - 3: $RSSI$ 가 가장 높은 Wi-Fi 액세스 포인트 (Access Point) 선택
 - 4: 3G에서 Wi-Fi로 네트워크 연결 전환 함수 호출
 - 5: }
-

알고리즘 4.1은 개선된 *AWNIS*의 무선 네트워크 인터페이스 선택 및 탐지 단계에서의 동작 과정을 설명한다. 개선된 *AWNIS*는 Wi-Fi 네트워크 탐지시 일정 신호

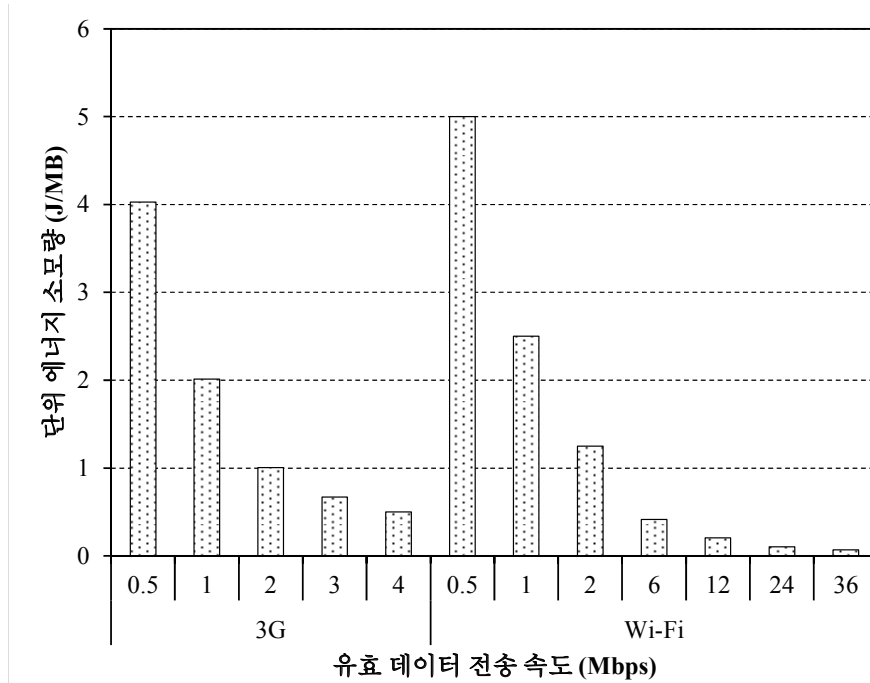


그림 4.13: 유효 데이터 전송 속도에 따른 단위 에너지 소모량 변화

기호	의미
TX_{3G}	3G 네트워크 인터페이스의 고유 송신 전력 (mW)
TX_{Wi-Fi}	Wi-Fi 네트워크 인터페이스의 고유 송신 전력 (mW)
$E[e_{3G}]$	3G 네트워크의 단위 에너지 소모량 기대값 (J/MB)
$E[e_{Wi-Fi}]$	Wi-Fi 네트워크의 단위 에너지 소모량 기대값 (J/MB)
$RSSI_{TH}$	Wi-Fi 네트워크 탐지의 성공 여부를 판단하기 위한 Wi-Fi 신호 세기 기준값 (Threshold Value) (단위: dBm)
$R_{3G}[t]$	t 번째 네트워크 사이클에서의 3G 네트워크의 평균 데이터 전송 속도 (MB/초)
$R_{Wi-Fi}[t]$	t 번째 네트워크 사이클에서의 Wi-Fi 네트워크의 평균 데이터 전송 속도 (MB/초)
$E[R_{3G}[t]]$	t 번째 네트워크 사이클에서의 3G 네트워크의 평균 데이터 전송 속도 기대값 (MB/초)
$E[R_{Wi-Fi}[t]]$	t 번째 네트워크 사이클에서의 Wi-Fi 네트워크의 평균 데이터 전송 속도 기대값 (MB/초)

표 4.4: 개선된 AWNIS의 설명을 위해 사용된 추가 기호와 그 의미

세기 ($RSSI_{TH}$) 이상을 가지는 액세스 포인트를 탐지한 경우에만 Wi-Fi 네트워크가 탐지된 것으로 판단한다. 이를 통해 Wi-Fi 네트워크 연결이 빈번히 끊어져 불필요한 네트워크 전환이 발생하는 문제를 완화할 수 있다. 그 외의 과정은 기존의 *AWNIS* 알고리즘과 동일하다.

알고리즘 4.2 3G에서 Wi-Fi로의 네트워크 연결 전환 단계에서의 개선된 *AWNIS* 동작

t 는 현재 네트워크 사이클, $t+1$ 는 다음 네트워크 사이클을 의미

- 1: $T_{3G}[t]$ 측정
 - 2: $R_{3G}[t]$ 측정
 - 3: $E[T_{3G}[t+1]]$ 갱신 : $E[T_{3G}[t+1]] = \alpha \times T_{3G}[t] + (1 - \alpha) \times E[T_{3G}[t]]$
 - 4: $E[R_{3G}[t+1]]$ 갱신 : $E[R_{3G}[t+1]] = \alpha \times R_{3G}[t] + (1 - \alpha) \times E[R_{3G}[t]]$
 - 5: $E[e_{3G}]$ 갱신 : $E[e_{3G}] = \frac{TX_{3G}}{E[R_{3G}[t+1]]}$
 - 6: $E[\lambda_{Wi-Fi}]$ 갱신 : $E[\lambda_{Wi-Fi}] = \frac{1}{E[T_{3G}[t+1]]}$
-

알고리즘 4.2는 개선된 *AWNIS*의 3G에서 Wi-Fi로의 네트워크 연결 전환 단계에서의 동작 과정을 설명한다. 기존의 동작에서 추가로 현재 네트워크 사이클에서의 3G 네트워크의 평균 데이터 전송 속도 ($R_{3G}[t]$)를 측정하고 다음 네트워크 사이클에서 기대되는 3G 네트워크의 평균 데이터 전송 속도 기대값 ($E[R_{3G}[t+1]]$)을 계산한다. 이를 통해 다음 네트워크 사이클에서 예측되는 3G 네트워크의 단위 에너지 소모량 기대값 ($E[e_{3G}]$)을 갱신한다. 그 외의 과정은 기존의 *AWNIS* 알고리즘과 동일하다.

알고리즘 4.3은 개선된 *AWNIS*의 Wi-Fi에서 3G로의 네트워크 연결 전환 단계에서의 동작 과정을 설명한다. 개선된 *AWNIS*는 기존의 동작에서 추가로 현재 네트워크 사이클에서의 Wi-Fi 평균 데이터 전송 속도 ($R_{Wi-Fi}[t]$)를 측정하고 다음 네트워크 사이클에서 기대되는 Wi-Fi 네트워크의 평균 데이터 전송 속도 기대값 ($E[R_{Wi-Fi}[t+1]]$)을 계산한다. 이 기대값을 이용하여 다음 네트워크 사이클에서 예측되는 Wi-Fi 네트워크의 단위 에너지 소모량 기대값 ($E[e_{Wi-Fi}]$)을 갱신한다. 이후 예측된 3G와 Wi-Fi 네트워크의 단위 에너지 소모량, Wi-Fi 네트워크 상태 전이율, 평균 데이터 전송 요청량을 제안된 에너지 소모 모델에 적용하여 다음 네트워크 사이클에서 사용할 새로운 네트워크 탐지 및 선택 주기를 선택하여 사용한다. 그 외의 과정은 기존의 *AWNIS* 알고리즘과 동일하다.

알고리즘 4.3 Wi-Fi에서 3G로의 네트워크 연결 전환 단계에서의 개선된 *AWNIS* 동작

t 는 현재 네트워크 사이클, $t+1$ 는 다음 네트워크 사이클을 의미

- 1: $T_{Wi-Fi}[t]$ 측정
 - 2: $R_{Wi-Fi}[t]$ 측정
 - 3: $AR[t]$ 측정
 - 4: $E[T_{Wi-Fi}[t+1]]$ 갱신 : $E[T_{Wi-Fi}[t+1]] = \alpha \times T_{Wi-Fi}[t] + (1-\alpha) \times E[T_{Wi-Fi}[t]]$
 - 5: $E[R_{Wi-Fi}[t+1]]$ 갱신 : $E[R_{Wi-Fi}[t+1]] = \alpha \times R_{Wi-Fi}[t] + (1-\alpha) \times E[R_{Wi-Fi}[t]]$
 - 6: $E[AR[t+1]]$ 갱신 : $E[AR[t+1]] = \alpha \times AR[t] + (1-\alpha) \times E[AR[t]]$
 - 7: $E[e_{Wi-Fi}]$ 갱신 : $E[e_{Wi-Fi}] = \frac{TX_{Wi-Fi}}{E[R_{Wi-Fi}[t+1]]}$
 - 8: $E[\mu_{Wi-Fi}]$ 갱신 : $E[\mu_{Wi-Fi}] = \frac{1}{E[T_{Wi-Fi}[t+1]]}$
 - 9: δ_{New} 계산 : $E[e_{3G}], E[e_{Wi-Fi}], E[\lambda_{Wi-Fi}], E[\mu_{Wi-Fi}], E[AR[t+1]]$ 을 이용하여 δ_{New} 계산
 - 10: δ_{NIS} 재설정 : $\delta_{NIS} = \delta_{New}$
-

개선된 *AWNIS*는 Wi-Fi에서 3G로 연결이 전환되는 조건을 추가하였다. 개선된 *AWNIS*의 Wi-Fi에서 3G로 연결이 전환되는 주요 조건들은 다음과 같다.

- Wi-Fi 네트워크 연결이 끊어지는 경우
- 현재 Wi-Fi 네트워크의 데이터 전송 속도가 3G 네트워크의 데이터 전송 속도보다 느린 경우 - $R_{3G}[t] < R_{Wi-Fi}[t]$, t 는 현재 네트워크 사이클

개선된 *AWNIS*는 Wi-Fi에 연결되어 있는 상태에서 데이터를 전송할 때, Wi-Fi의 데이터 통신 속도가 현재 네트워크 사이클에서 측정되었던 3G의 데이터 전송 속도보다 느린 경우에는 3G로 연결을 전환한다. 이러한 정책을 통해 Wi-Fi가 3G보다 데이터 전송 속도와 에너지 소모량 측면에서 효율적이지 못한 상황에서 지속적으로 Wi-Fi를 사용함으로써 발생할 수 있는 성능 저하를 감소시킬 수 있다.

4.4.2 개선된 *AWNIS*의 성능 분석을 위한 시뮬레이션 환경

개선된 *AWNIS*의 성능 분석을 위한 시뮬레이션 파라미터는 표 4.5와 같다. 3G와 Wi-Fi 네트워크의 데이터 통신 속도는 기지국과 Wi-Fi의 액세스 포인트로부터의 신호 세기에 따라 변한다. 이때 3G 네트워크의 단위 에너지 소모량은 거리에 따른 무선 링크의 품질에 의한 유효 데이터 전송 속도에 따라 변한다고 가정한다. 추가적으로 Wi-Fi 네트워크의 단위 에너지 소모량은 Wi-Fi 액세스 포인트를 공유하는 사용자 수에 의한 Wi-Fi 액세스 포인트의 성능 저하 요소에 의해서도 변한다고 가정한다. 이때 거리에 따른 신호 세기의 감소는 장거리 경로 손실 모델 (Long-distance Path Loss Model)을 적용하였다.

3G와 Wi-Fi 장치의 송신 전력은 표 3.6을 기반으로 설정하였다. 표 3.6을 기반으로 Wi-Fi 네트워크 탐지는 1초 내에 탐지가 한 경우를 가정하여 네트워크 탐지 비용을 400 mJ의 고정 비용을 갖도록 설정하였다. 따라서 시뮬레이션에서 *AWNIS*는 고정적인 단위 에너지 소모량이 아닌 3G와 Wi-Fi 장치의 송신 전력(단위: mW)과 3G와 Wi-Fi 네트워크의 유효 데이터 전송 속도를 이용하여 단위 에너지 소모량을 계산 및 예측하고 제안된 에너지 모델에 기반하여 최적의 네트워크 탐지 및 선택 주기를 조절한다. 그외의 가정사항은 기존의 시뮬레이션 환경과 동일하다.

4.4.3 개선된 *AWNIS*의 성능 분석 및 비교

성능 분석 및 비교를 위해 에너지 최소 기법(3G|Wi-Fi E-Optimal), 전송 시간 최소 기법(3G|Wi-Fi D-Optimal), 고정 주기로 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 기법(3G|Wi-Fi w/o *AWNIS*), 3G만을 사용하는 기법(3G only)을 비교 대상으로 개선된 *AWNIS* 성능을 평균 에너지 소모량과 데이터 전송 소요 시간 측면에서 분석한다. 각 기법의 세부적인 설명은 다음과 같다.

- 에너지 최소 기법(3G|Wi-Fi E-Optimal) - 네트워크 환경 변화를 정확히 알 수 있어 주기적인 네트워크 탐지 동작 없이 에너지 소모량이 최소인 네트워크를 선택하여 항상 사용하는 방법
- 전송 시간 최소 기법(3G|Wi-Fi D-Optimal) - 네트워크 환경 변화를 정확히 알 수 있어 주기적인 네트워크 탐지 동작 없이 데이터 전송 속도가 가장 빠른 네트워크를 선택하여 항상 사용하는 방법

파라미터 명	값
네트워크 필드 크기	1000 m × 1000 m
워크로드 종류	100 KB/초
3G의 데이터 전송시 전송 전력	251.8 mW
Wi-Fi의 데이터 전송시 전송 전력	312.6 mW
네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 비용	400 mW (400 mJ/동작)
초기 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기	30 초
최대 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기	300 초
Wi-Fi 네트워크 탐지 성공 기준 신호 세기	-89 dBm
Wi-Fi	802.11g
3G	HSPA
3G 기지국 (Basestation) 의 수	1
3G 기지국 (Basestation) 의 서비스 반경	1 Km
Wi-Fi 액세스 포인트 (AP) 의 수	5, 10, 15, 20, 25
Wi-Fi 액세스 포인트의 서비스 반경	100 m
전파 손실 모델	장거리 경로 손실 모델 (Long-distance Path Loss Model)
사용자 이동 속도	1 m/s - 3 m/s
사용자 이동 모델	임의 방향 모델 (Random Direction Model)

표 4.5: 시뮬레이션 파라미터 (II)

- 고정 주기 기반으로 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 기법(3G|Wi-Fi w/o *AWNIS*) - 설정된 고정 주기를 기반으로 네트워크 탐지 및 선택 동작을 수행하여 3G와 Wi-Fi를 선택적으로 사용하는 방법
- 3G 만을 사용하는 방법(3G Only) - 데이터 전송시 3G 만을 사용하는 방법

그림 4.14와 그림 4.15는 Wi-Fi 액세스 포인트 수의 변화에 따른 평균 에너지 소모량과 데이터 전송 소요 시간을 보여준다. 그림 4.14와 그림 4.15를 이용하여 Wi-Fi의 가용성에 따른 *AWNIS*의 성능을 분석할 수 있다.

그림 4.14의 평균 에너지 소모량 결과에 의하면, Wi-Fi 액세스 포인트 수가 5인 경우에는 Wi-Fi의 서비스 영역이 매우 작아 주기적인 Wi-Fi 네트워크 탐지 및

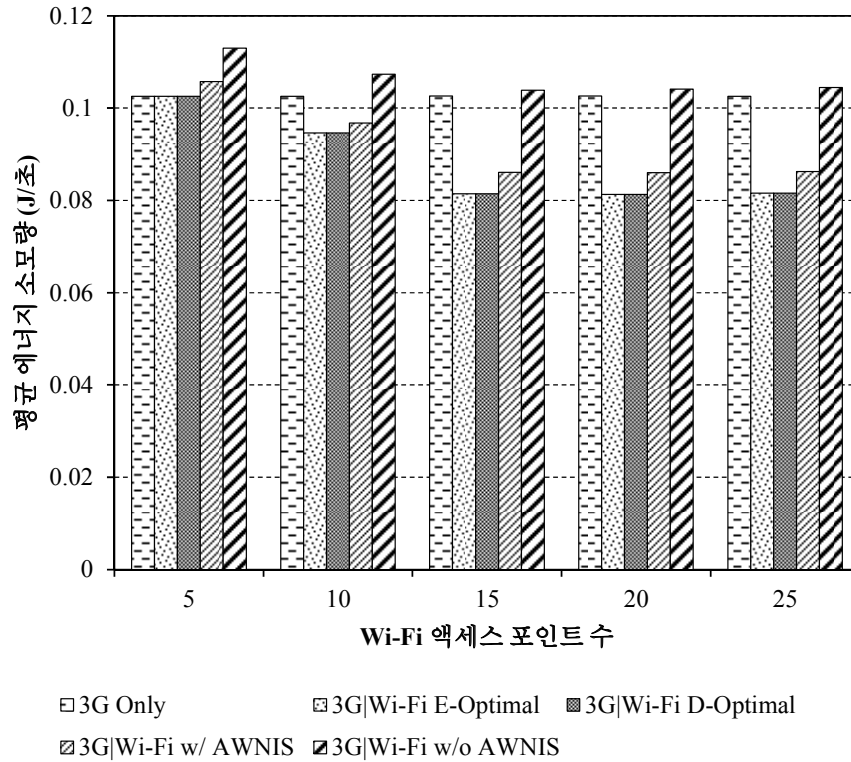


그림 4.14: Wi-Fi 액세스 포인트 수의 변화 따른 평균 에너지 소모량 (평균 데이터 전송 요청량 = 100 KB/s, 고정 주기 = 30 초)

선택 비용이 상대적으로 크다. 따라서 *AWNIS*의 에너지 소비 측면의 효율성이 3G만을 사용하여 데이터를 전송하는 기법 (3G Only)보다 떨어지는 것을 확인 할 수 있다. 하지만, Wi-Fi 액세스 포인트의 수가 증가할수록 *AWNIS*의 에너지 소모량이 감소하여 3G만을 사용하는 기법보다 효율적임을 알 수 있다. 또한 고정 주기를 기반으로 3G와 Wi-Fi를 모두 사용하는 기법 (3G|Wi-Fi w/o *AWNIS*)은 Wi-Fi가 3G보다 에너지 소모량 측면에서 효율적이지 못한 상황에서도 지속적으로 Wi-Fi를 통해 데이터를 전송하므로 Wi-Fi의 액세스 포인트수가 증가하더라도 에너지 소모량이 줄어들지 않고 증가할 수 있음을 확인할 수 있다. *AWNIS*의 성능을 최적의 사용 기법들과 비교하면, *AWNIS*가 약 2% ~ 6% 정도의 에너지를 더 소모한다.

그림 4.15의 평균 데이터 전송 소요 시간 결과를 통해 Wi-Fi의 가용성이 작은 경우에는 데이터 전송 효율성 측면에서도 3G만을 사용하는 기법에 비해 *AWNIS*의

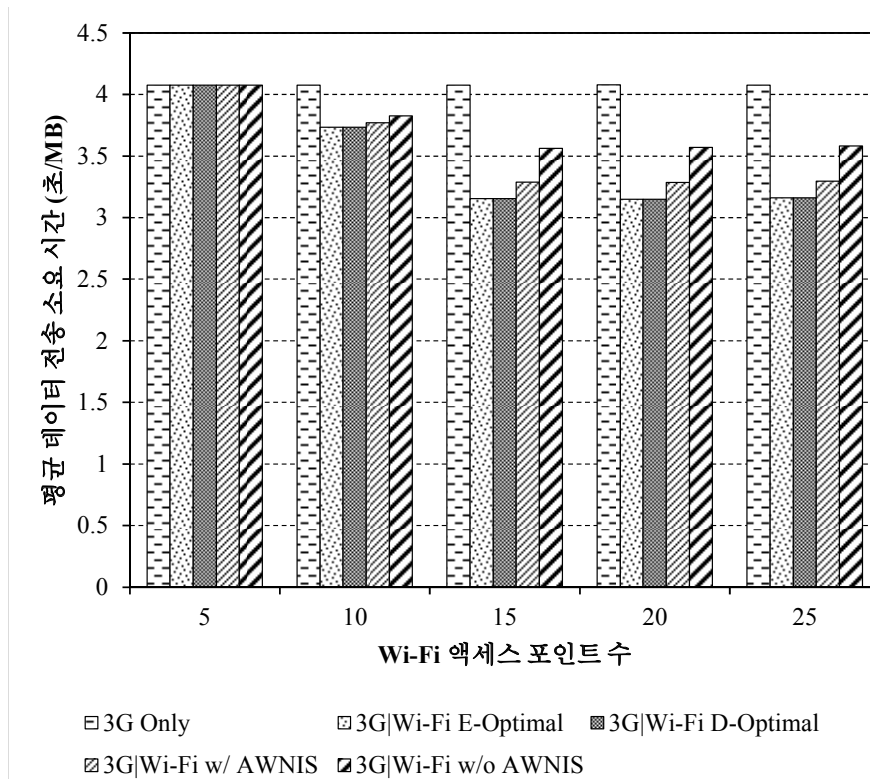


그림 4.15: Wi-Fi 액세스 포인트 수의 변화 따른 평균 데이터 전송 소요 시간 (고정 주기 = 30 초)

효율성이 떨어질 수 있음을 알 수 있다. 하지만 Wi-Fi 액세스 포인트 수가 증가함에 따라 AWNIS의 데이터 전송시 소요되는 시간이 줄어들어 3G 만을 이용하여 데이터를 전송하는 기법보다 AWNIS가 효율적임을 확인 할 수 있다.

그림 4.16와 그림 4.17은 Wi-Fi 액세스 포인트의 성능 저하에 의한 평균 에너지 소모량과 데이터 전송 소요 시간을 보여준다. 즉, Wi-Fi 액세스 포인트로부터의 수신 신호의 세기 (RSSI)가 크더라도 사용자 수가 많아 실제 데이터 전송 속도가 떨어지는 경우를 반영한 시뮬레이션 결과이다.

그림 4.16을 통해 Wi-Fi 액세스 포인트의 성능이 감소함에 따라 최적의 사용 기법 (3G|Wi-Fi Optimal-E, 3G|Wi-Fi Optimal-D)과 AWNIS 모두 에너지 소모량이 증가함을 알 수 있다. AWNIS는 주기적인 Wi-Fi 네트워크 탐지 비용으로 인해 Wi-Fi 액세스 포인트의 성능이 매우 떨어진 상황에서는 3G 만을 사용하는 기법보다 에너

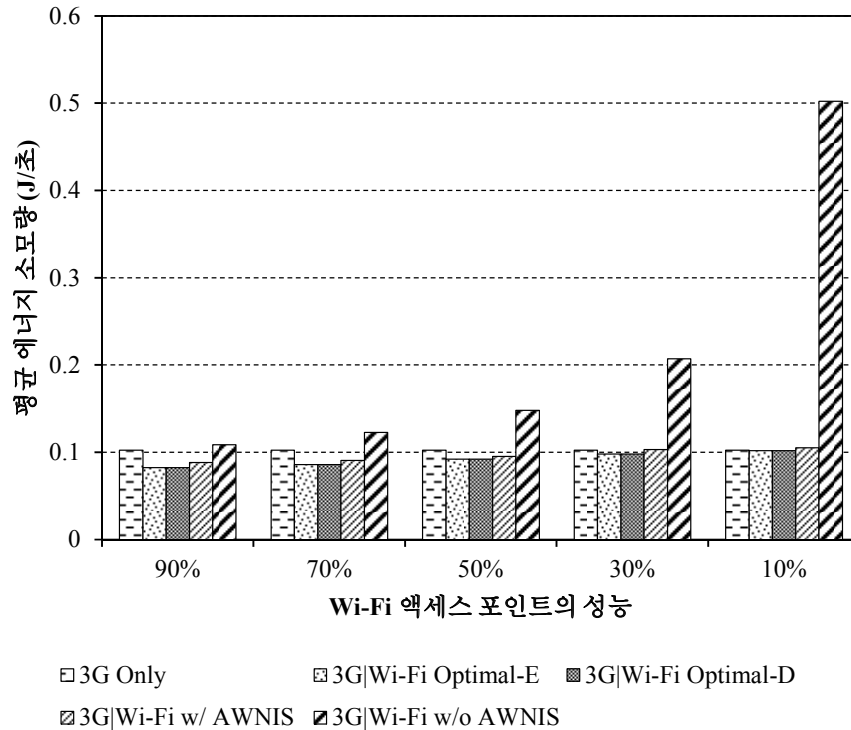
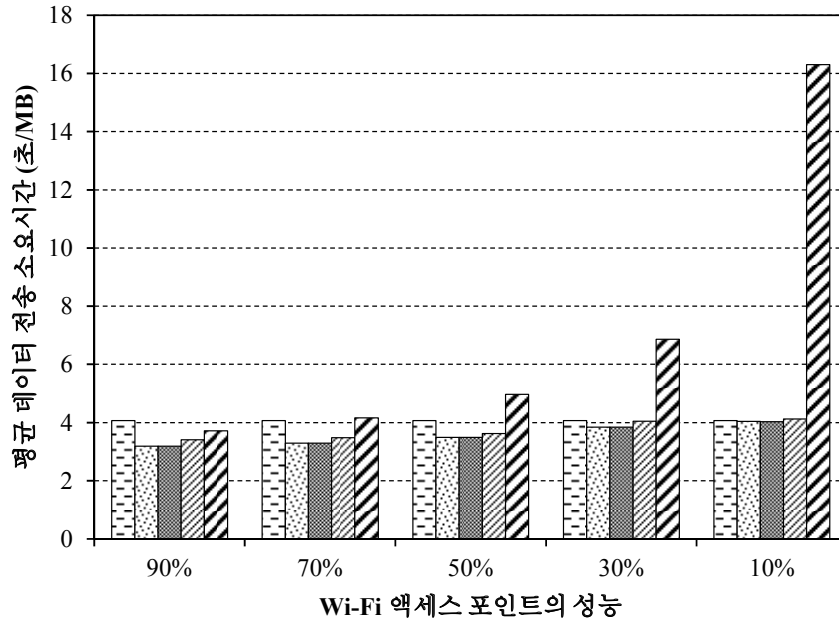


그림 4.16: Wi-Fi 액세스 포인트의 성능 저하에 의한 평균 에너지 소모량 (AP의 수 = 15, 평균 데이터 전송 요청량 = 100 KB/s, 고정 주기 = 30 초)

지 소모량이 큰 것을 확인할 수 있다. 하지만, 고정 주기 기반의 기법(3G|Wi-Fi w/o AWNIS)과 비교할 때, AWNIS는 Wi-Fi의 전송 속도가 3G 보다 떨어지는 경우에는 3G로 네트워크의 연결을 전환하여 데이터를 전송하므로 에너지 소모량의 증가량이 크지 않다. AWNIS의 성능을 최적의 사용 기법들과 비교하면, AWNIS가 약 3% ~ 7% 정도의 에너지를 더 소모한다.

그림 4.17의 데이터 전송 소요 시간 결과를 통해 Wi-Fi의 성능이 떨어질수록 최적의 사용 기법과 AWNIS 모두 데이터 전송 소요 시간이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Wi-Fi에 연결이 되더라도 실제 데이터 전송 속도가 3G 보다 떨어질 수 있기 때문이다. Wi-Fi 액세스 포인트의 성능이 10% 수준으로 떨어진 경우에는 AWNIS가 3G 만을 사용하는 방법보다 데이터 전송 소요시간이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 하지만, 개선된 AWNIS는 Wi-Fi의 성능이 3G보다 떨어지는 경우에는 3G로 네트워크 연결을 전환하여 데이터를 전송하므로 데이터 전송 시간의 증가폭이



□ 3G Only □ 3G|Wi-Fi Optimal-E ■ 3G|Wi-Fi Optimal-D
 ▨ 3G|Wi-Fi w/ AWNIS ▩ 3G|Wi-Fi w/o AWNIS

그림 4.17: Wi-Fi 액세스 포인트의 성능 저하에 의한 평균 데이터 전송 소요 시간 (AP의 수 = 15, 고정 주기 = 30 초)

크지 않다. 고정 주기 기반의 기법의 경우에는 Wi-Fi가 3G 보다 비효율적인 상황에서도 Wi-Fi를 이용하여 데이터 통신을 진행하므로 데이터 전송 시간 증가폭이 매우 크다.

제 5 장 결론 및 향후 연구

5.1 결론

무선 통신 기술의 발달과 모바일 기기의 컴퓨팅 성능의 증가로 다중 무선 통신 기법을 지원하여 다양한 응용에 사용될 수 있는 스마트 폰이나 스마트 패드와 같은 형태의 모바일 장치가 일상 생활 뿐 만 아니라 산업 전 분야에서 걸쳐 널리 다양한 용도로 사용되고 있다. 다중 무선 네트워크 인터페이스를 갖는 모바일 장치가 지원하는 3G, Wi-Fi, LTE와 같은 네트워크 통신 기법은 각각의 통신 기법의 데이터 전송 속도, 서비스 반경, 에너지 소모량과 같은 특성은 매우 다르다. 또한 대부분의 모바일 장치는 일반적인 컴퓨팅 환경과 다르게 상시 전원이 아닌 배터리 기반으로 동작하며, 모바일 장치에 장착된 배터리는 제한된 용량 (2000 mA - 4000 mA)을 갖고 있어 에너지 효율성은 매우 중요한 요소이다.

모바일 장치의 에너지 효율성을 증대시키기 위해 운영체제 수준이나 응용 수준 등의 다양한 수준에서 에너지 효율성을 증대시키기 위한 다양한 기법들의 적용이 가능하다. 이와 관련하여 모바일 장치의 에너지 효율성을 증가시키고 데이터 전송 지연 시간을 최소화 하기 위해서는 네트워크 환경 변화를 고려하여 에너지 효율적이고 보다 빠른 데이터 전송 속도를 지원할 수 있는 네트워크 인터페이스를 선택하여 데이터를 전송하는 효율적인 네트워크 인터페이스 선택 기법이 필요하다.

본 논문에서는 두 개의 서로 다른 특성을 갖는 근거리 (Wi-Fi), 원거리 (3G) 무선 네트워크 인터페이스를 가지는 모바일 장치를 가정하고 네트워크 탐지 및 선택 주기에 따른 에너지 소모량과 데이터 전송시 네트워크 인터페이스를 사용하는 방법에 따른 데이터 전송 지연 시간을 모델링하였다. 모델링된 에너지 소모량 모델과 데이터 전송 지연 모델을 이용하여 네트워크 탐지 및 선택 주기에 따른 에너지 소모량과 데이터 전송 지연 시간 측면의 비용을 분석하였다. 에너지 소모량 모델의 분석을 통해 데이터 전송시 모바일 장치의 에너지 소모량을 최소화 할 수 있는 네트워크 인터페이스 탐지 및 선택 주기가 존재함을 보였다. 또한 모델링 된 에너지 소모량 모델과 데이터 전송 지연 시간 모델을 기반으로 다중 무선 네트워크 인터페이스를

가지는 모바일 장치를 위한 에너지 효율적인 무선 네트워크 인터페이스 선택 기법 (*AWNIS, Adaptive Wireless Network Interface Selection*)을 제안하였다.

제안된 *AWNIS*는 에너지 효율적인 네트워크 인터페이스를 선택하기 위한 네트워크 탐지 및 선택 주기를 네트워크 환경의 변화에 따라 동적으로 조절하여 네트워크 탐지 및 선택 비용을 최소화하여 모바일 장치의 에너지 효율성을 높인다. 네트워크 탐지 및 선택 주기를 동적으로 재조정할 때에는 제안한 에너지 소비량 모델을 기반으로 현재 근사화된 네트워크 환경에서 에너지 소모량을 최소화할 수 있는 최적의 주기로 네트워크 탐지 및 선택 주기를 재조정한다. 제안한 *AWNIS*의 성능을 에너지 소모량과 전송 지연 시간 측면에서 검증하기 위하여 다양한 합성 워크로드와 실제 사용과 유사한 워크로드를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 수행과 결과 분석을 통해 제안한 *AWNIS*가 데이터 전송 속도와 에너지 효율적인 네트워크 인터페이스를 네트워크 환경의 변화에 따라 선택적으로 사용함으로써 모바일 장치의 에너지 효율성을 높이고 데이터 전송 지연 시간을 효과적으로 줄일 수 있음을 보였다.

*AWNIS*를 적용하여 동적 주기를 이용하여 네트워크 인터페이스를 탐지하고 선택 할 수 있는 네트워크 선택 기법의 경우 일정 수준의 데이터 전송 지연 시간을 보장하면서 모바일 장치의 에너지 소모량을 효율적으로 감소시킬 수 있으므로 데이터 전송 지연 시간에 민감한 보안에 관련된 네트워크 응용 등에 매우 적합하다. 또한 제안된 *AWNIS*는 앞으로 개발되어 모바일 장치에서 사용될 수 있는 근거리, 원거리 무선 네트워크 간의 인터페이스 선택에 확장하여 적용이 가능하다.

5.2 향후 연구

본 논문에서는 에너지 소모량과 데이터 전송 소요 시간을 모델링하여 분석할 때, 고정적인 비용 모델을 이용하여 에너지 소모량과 데이터 전송 소요 시간을 분석하였다. 하지만, 각 모델에 단순화하여 사용한 요소들은 실제 네트워크 환경에서는 사용자의 이동성, 네트워크 신호 세기에 따른 전송 속도 등의 영향을 받아 변하게 된다. 데이터 전송 시간 또한 각 네트워크의 핸드오버에 소요되는 시간에 따라 증가할 수 있으므로 이에 대한 추가적인 고려가 필요하다. 따라서 이와 같은 요소를 추가로 반영하여 에너지 소모 모델과 데이터 전송 소요 시간 모델의 개선이 필요하다.

실제 환경에서도 제안 알고리즘이 효과적으로 사용되기 위해서는 네트워크 환경의 급격한 변화와 같은 상황에서도 효율적으로 동작될 수 있어야 한다. 따라서 네트워크의 사용자 수, 사용자의 이동성, 네트워크 신호 세기 등과 같은 네트워크 환경 변화 요소를 추가로 좀 더 명확하게 알고리즘에 반영하여 실제 네트워크 환경 변화를 좀 더 정확하게 예측할 수 있도록 개선하여야 한다. 또한 제안 알고리즘의 실제 구현을 통해 알고리즘의 성능을 개선하고 성능의 최적화가 필요하다. 추후 연구로서 이러한 점을 반영하여 실제 네트워크 환경에서도 적응성있게 동작할 수 있는 네트워크 인터페이스 선택 기법의 개발이 필요하다.

마지막으로 본 논문에서 제안하는 에너지 효율적인 무선 네트워크 인터페이스 선택 기법의 또 다른 향후 연구로는 MIH(Media Independent Handover) 기술과의 연계이다. MIH 기술은 서로 다른 네트워크 통신 기술 간의 수직 핸드오버 (Vertical Handover)를 지원하기 위한 기술이다. 제안 기법을 MIH 기술에 실제 적용하여 효율적으로 핸드오버 가능한 네트워크를 탐지하고 선택함으로써 핸드오버 효율성의 향상이 가능하다.

참 고 문 헌

- [ACW⁺07] Y. Agarwal, R. Chandra, A. Wolman, P. Bahl, K. Chin, and R. Gupta. Wireless wakeups revisited: energy management for voip over wi-fi smartphones. In *Proceedings of the 5th International Conference on Mobile systems, Applications and Services, MobiSys '07*, pages 179–191, 2007.
- [Bal07] R. Balani. Energy consumption analysis for bluetooth, wifi and cellular networks. [Online]. <http://nesl.ee.ucla.edu/fw/documents/reports/2007/PowerAnalysis.pdf>, 2007.
- [BBV09] N. Balasubramanian, A. Balasubramanian, and A. Venkataramani. Energy consumption in mobile phones: a measurement study and implications for network applications. In *Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement Conference, IMC '09*, pages 280–293, 2009.
- [Bha08] U. N. Bhat. *An introduction to queueing theory: modeling and analysis in applications*. Springer, 2008.
- [BMS12] A. Benharref, R. Mizouni, and M. A. Serhani. Towards a best-effort framework for developing smart mobile applications. In *Proceedings of the 2012 8th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IWCMC '12*, pages 752–757, 2012.
- [CH12] T. M. Chiwewe and G. P. Hancke. A distributed topology control technique for low interference and energy efficiency in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 8(1):11–19, 2012.

- [Cha03] S. Chandra. Wireless network interface energy consumption: implications for popular streaming formats. *Multimedia Systems*, 9(2):185–201, 2003.
- [CXC11] S. Chareen, H. Xie, and P. Cole. Wina: a framework to conserve energy in mobile wireless communications. In *Proceedings of the 2011 13th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, pages 132–137, 2011.
- [DSP10] F. R. Dogar, P. Steenkiste, and K. Papagiannaki. Catnap: exploiting high bandwidth wireless interfaces to save energy for mobile devices. In *Proceedings of the 8th International Conference on Mobile systems, Applications, and Services, MobiSys '10*, pages 107–122, 2010.
- [DZYD13] S. X. Ding, P. Zhang, S. Yin, and E. L. Ding. An integrated design framework of fault-tolerant wireless networked control systems for industrial automatic control applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1):462–471, 2013.
- [ERG10] M. A. Ergin, K. Ramachandran, and M. Gruteser. (crawdad) trace rutgers/apdensity/workload/realistictraffic. [Online]. http://crawdad.cs.dartmouth.edu/rutgers/ap_density/workload/realisticTraffic, 2010.
- [FVFM05] N. Fourty, T. Val, P. Fraisse, and J.-J. Mercier. Comparative analysis of new high data rate wireless communication technologies ”from wi-fi to wimax”. In *Proceedings of the Joint International Conference on Autonomic and Autonomous Systems and International Conference on Networking and Services, ICAS-ICNS '05*, pages 66–66, 2005.
- [GD10] R. Gass and C. Diot. An experimental performance comparison of 3g and wi-fi. In *Proceedings of the 11th International Conference on Passive and Active Measurement, PAM '10*, pages 71–80, 2010.
- [GNT06] L. Georgiadis, M. J. Neely, and L. Tassiulas. *Resource allocation and cross-layer control in wireless networks*. Now Publishers Inc, 2006.

- [GSTH13] D. Gross, J. F. Shortle, J. M. Thompson, and C. M. Harris. *Fundamentals of queueing theory*. Wiley.com, 2013.
- [HLS11] J. Holz, T. Leonhardt, and U. Schroeder. Using smartphones to motivate secondary school students for informatics. In *Proceedings of the 11th Koli Calling International Conference on Computing Education Research*, Koli Calling '11, pages 89–94, 2011.
- [HMRP⁺13] H. Hassan, J.-M. Martinez-Rubio, A. Perles, J.-V. Capella, C. Dominguez, and J. Albaladejo. Smartphone-based industrial informatics projects and laboratories. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1):557–566, 2013.
- [KA08] S. Kulkarni and P. Agrawal. Smartphone driven healthcare system for rural communities in developing countries. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Systems and Networking Support for Health Care and Assisted Living Environments*, HealthNet '08, pages 1–3, 2008.
- [KCH14] B. Kim, Y. Cho, and J. Hong. Awnis: Energy-efficient adaptive wireless network interface selection for industrial mobile devices. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(1):714–729, 2014.
- [Nee06] M. J. Neely. Energy optimal control for time-varying wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(7):2915–2934, 2006.
- [PAGW06] T. Pering, Y. Agarwal, R. Gupta, and R. Want. Coolspots: reducing the power consumption of wireless mobile devices with multiple radio interfaces. In *Proceedings of the 4th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*, MobiSys '06, pages 220–232, 2006.
- [PH12] K. Pousttchi and Y. Hufenbach. Mobile payment in the smartphone age: extending the mobile payment reference model with non-traditional revenue streams. In *Proceedings of the 10th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia*, MoMM '12, pages 31–38, 2012.

- [PVK10] J. Ploennigs, V. Vasyutynskyy, and K. Kabitzsch. Comparative study of energy-efficient sampling approaches for wireless control networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 6(3):416–424, 2010.
- [Qiu11] Y. Qiu. Hip based mobility management for heterogeneous networks. In *Proceedings of the 2011 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM '11*, pages 1–4, 2011.
- [Ros01] S. M. Ross. *Stochastic processes*. Wiley, New York, 2001.
- [Ros06] S. M. Ross. *Introduction to probability models*. Access Online via Elsevier, 2006.
- [RPS⁺10] M.-R. Ra, J. Paek, A. B. Sharma, R. Govindan, M. H. Krieger, and M. J. Neely. Energy-delay tradeoffs in smartphone applications. In *Proceedings of the 8th International Conference on Mobile systems, Applications, and Services, MobiSys '10*, pages 255–270, 2010.
- [RZ07] A. Rahmati and L. Zhong. Context-for-wireless: context-sensitive energy-efficient wireless data transfer. In *Proceedings of the 5th International Conference on Mobile systems, Applications and Services, MobiSys '07*, pages 165–178, 2007.
- [SMAA08] R. A. Saeed, H. Mohamad, B. M. Ali, and M. Abbas. Wifi/wimax heterogeneous seamless handover. In *Proceedings of the 2008 Third International Conference on Broadband Communications, Information Technology Biomedical Applications*, pages 169–174, 2008.
- [SSM09] A. Shye, B. Scholbrock, and G. Memik. Into the wild: studying real user activity patterns to guide power optimizations for mobile architectures. In *Proceedings of the 42nd Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture, MICRO '42*, pages 168–178, 2009.
- [SSMD10] A. Shye, B. Scholbrock, G. Memik, and P. A. Dinda. Characterizing and modeling user activity on smartphones: summary. In *Proceedings*

of the ACM SIGMETRICS International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems, SIGMETRICS '10, pages 375–376, 2010.

- [Tri02] K. S. Trivedi. *Probability and statistics with reliability, queuing, and computer science applications*. Prentice-hall Englewood Cliffs, 2002.
- [TS09] C.-L. Tsao and R. Sivakumar. On effectively exploiting multiple wireless interfaces in mobile hosts. In *Proceedings of the 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies, CoNEXT '09*, pages 337–348, 2009.
- [VBH03] M. A. Viredaz, L. S. Brakmo, and W. R. Hamburger. Energy management on handheld devices. *Queue*, 1(7):44–52, 2003.
- [VJ01] U. Varshney and R. Jain. Issues in emerging 4g wireless networks. *Computer*, 34(6):94–96, 2001.
- [VSTB13] S. Vitturi, L. Seno, F. Tramarin, and M. Bertocco. On the rate adaptation techniques of iee 802.11 networks for industrial applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1):198–208, 2013.
- [WKHW02] A. Willig, M. Kubisch, C. Hoene, and A. Wolisz. Measurements of a wireless link in an industrial environment using an iee 802.11-compliant physical layer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(6):1265–1282, 2002.
- [WM10] L. Wang and J. Manner. Energy consumption analysis of wlan, 2g and 3g interfaces. In *Proceedings of the 2010 IEEE/ACM International Conference on International Conference on Cyber, Physical and Social Computing (CPSCoM), Green Computing and Communications (GreenCom)*, pages 300–307, 2010.
- [WMW05] A. Willig, K. Matheus, and A. Wolisz. Wireless technology in industrial networks. *Proceedings of the IEEE*, 93(6):1130–1151, 2005.

- [ZK07] M. Zaharia and S. Keshav. Fast and optimal scheduling over multiple network interfaces. *University of Waterloo Technical Report, CS-2007-36*, 2007.

Abstract

Mobile devices such as smart-phones and smart-pads are widely used not only in our everyday lives but also in various industrial fields by the development of wireless network and mobile computing technologies. Energy efficiency is very important for mobile devices because most of these mobile devices operate on limited battery power. Wireless network technologies such as Wi-Fi, 3G, and LTE have fairly different characteristics in terms of its energy consumption, service area, data transfer rate, and other factors. Efficiencies in terms of energy consumption and data transfer can be improved by leveraging the characteristics of the wireless network technologies.

In this dissertation, we assume a mobile device that is equipped with 3G and Wi-Fi network interfaces. We model an energy consumption and data transfer time of the mobile device due to changes in network detection and selection interval. Based on analysis results of the proposed models, we show the existence of the optimal network detection and selection interval which minimizes the energy consumption. The optimal network detection and selection interval changes according to the network environment such as the amount of requested data or availability of Wi-Fi. Based on the above observations, we propose an energy-efficient adaptive wireless network interface-selection scheme, termed *AWNIS* that can adjust the detection and selection interval dynamically. *AWNIS* uses a dynamic network selection and detection interval in order to use Wi-Fi network that is more efficient than 3G network in terms of energy consumption and data transfer. When selecting the interval, *AWNIS* chooses the interval based on the proposed energy consumption model and approximated availability of Wi-Fi network. In this manner, *AWNIS* improves the energy and data transfer efficiencies of mobile devices. Based on the simulation results, we show that the proposed scheme effectively improves the energy efficiency while guaranteeing a certain level of data transfer delay.

Proposed *AWNIS* also can be applied to mobile devices equipped with future short and long range network interfaces which have similar characteristics compared to 3G and Wi-Fi network interfaces.

Keywords: Mobile Devices, Wireless Network Interfaces, Network Interface Selection, Energy Efficiency

Student Number: 2008-20839