

Estimation of North Korea's uranium production using Bayesian network

Korean Nuclear Society Spring Meeting
May 13-14, 2021

Yein Seo

목 차

1

서 론

2

베이지안 네트워크

3

네트워크 모델링

4

결과 논의

5

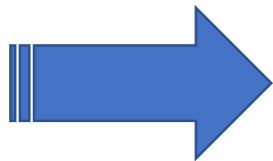
결론과 활용

➤북한의 핵물질 생산량 및 생산능력 추정의 불확실성

- 북한 체제와 핵 프로그램의 폐쇄성 • 베타성
- 북한 핵물질 생산량에 대한 정보의 적은 양과 낮은 신빙성
- 연구자, 자료에 따른 추정치의 큰 불확실성

Table 1. 자료에 따른 북한 우라늄 농축 능력 추정치^a

Reference	Number of centrifuges	kg-SWU/y
Hecker (2010)	2000	8000-10,000
Heinonen (2015)	5900	23,600-35,400
Braun et al. (2016)	6000	24,000-30,000
Albright (2018)	10,000-16,000	40,000-96,000
Hecker (2019)	8000	32,000-48,000



베이지안 네트워크 (Bayesian Network, BN)

: 불확실성을 고려한 인과관계 내 정량적 추정 능력

➤ BN 이용 북핵 생산량 추정 사례

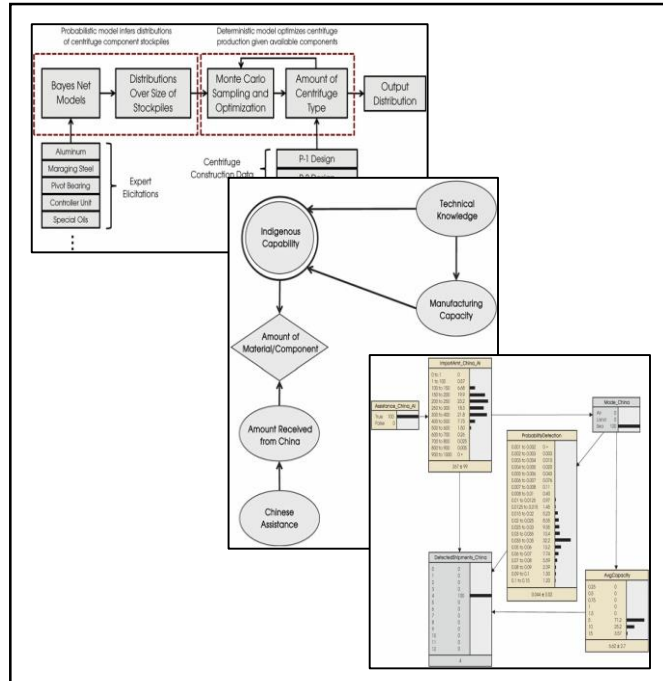


Fig 1. Bistline의 BN 이용 북핵 핵물질 생산능력 추정^{b)}

- 은폐가 쉬운 **농축** 시설 및 능력을 주된 변수로 하여 검증이 어려움
- **플루토늄** 미고려

➤ 전주기 양방향 북핵 추정 사례

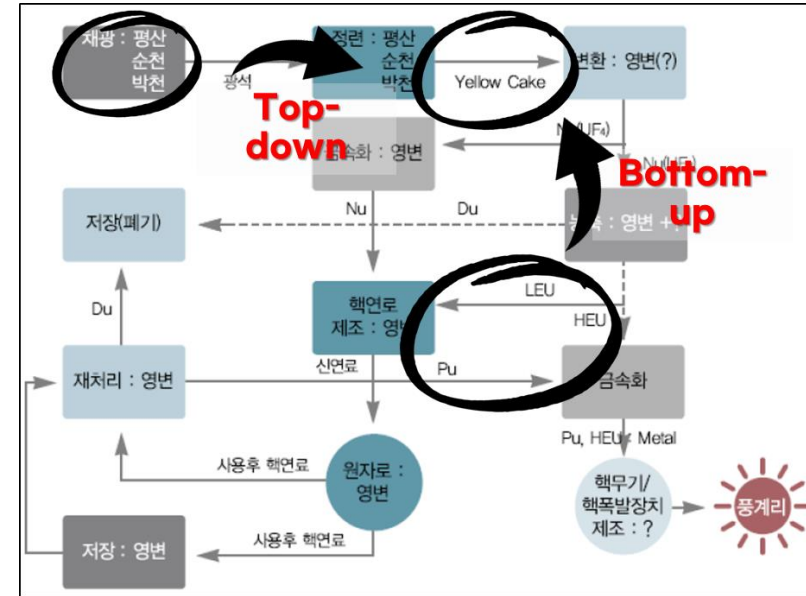


Fig 2. Von Hippel의 전주기 양방향 북핵 핵물질 생산량 추정법 개념

- **전체 핵주기** 및 저 • 고농축 우라늄, 플루토늄 고려
- **양방향**
 - Top-down (채광 → 원광, 정광)
 - Bottom-up (보유 핵물질 → 원광, 정광)

^{b)} J. E. Bistline, D. M. Blum, C. Rinaldi, G. Shields-Estrada, S. S. Hecker, and M. E. Paté-Cornell, "A Bayesian Model to Assess the Size of North Korea's Uranium Enrichment Program," Science & Global Security, vol. 23, no. 2, pp. 71-100, 2015.

^{c)} D. F. Von Hippel, "Methods for Refining Estimates of Cumulative DRPK Uranium Production," Journal for Peace and Nuclear Disarmament, vol. 2, no. 2, pp. 555-585, 2019/07/03 2019.

➤ 베이지안 네트워크 (Bayesian Network, BN)

- 베이지안 확률론 + 그래픽 이론
- 방향성 비순환 그래프 (Directed Acyclic Graph, DAG)
- 노드 (Node), 링크 (Link), 조건부확률표 (Conditional Probability Table, CPT)로 구성
- 노드의 각 상태 (State)의 조합에 대한 확률 부여

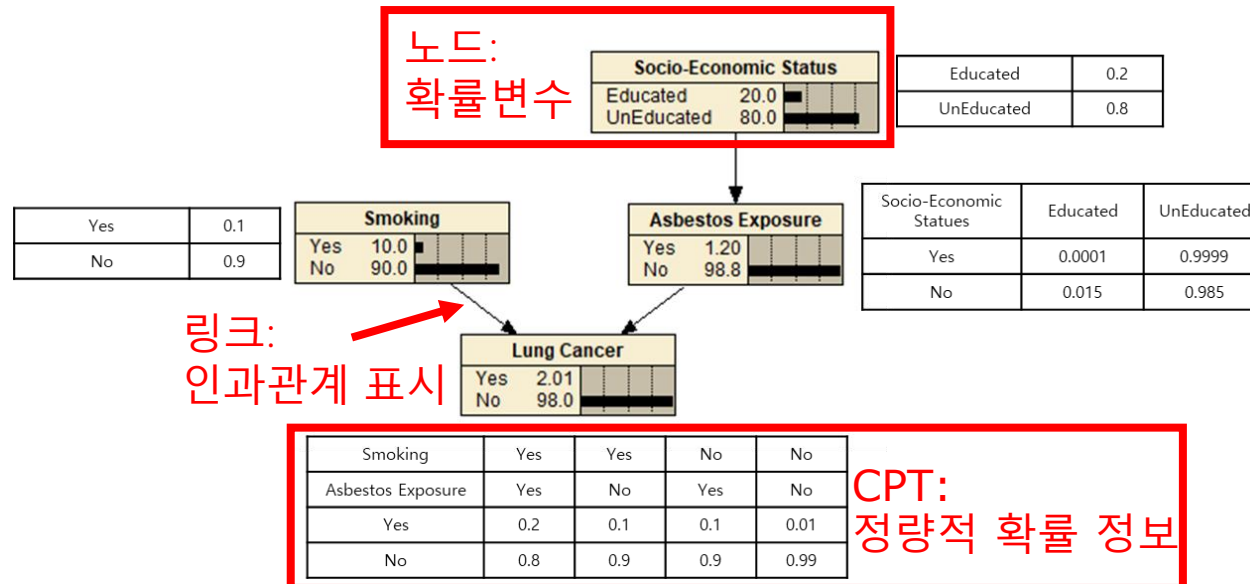


Fig 3. 폐암 발생에 대한 간단한 베이지안 네트워크 예시

➤ 베이즈 정리 (Bayes' Theorem)

- 베이즈 정리를 통해 변수들의 확률 갱신 및 인과관계 추정을 표현
- 조건부확률과 전체 확률 법칙을 바탕으로 둠

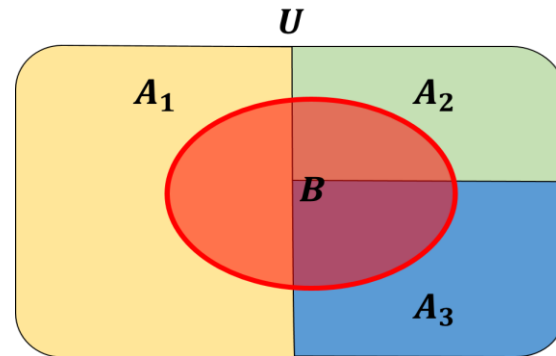


Fig 4. 전체 확률 법칙을 이루는 벤다이어그램

$$P(A_i|B) = \frac{P(A_i \cap B)}{P(B)} = \frac{P(A_i)P(B|A_i)}{P(B)} = \frac{P(A_i)P(B|A_i)}{\sum_{i=1}^N P(A_i)P(B|A_i)}$$

➤ 베이즈 정리 (Bayes' Theorem)

- 베이즈 정리를 통해 변수들의 확률 갱신 및 인과관계 추정을 표현
- 조건부확률과 전체 확률 법칙을 바탕으로 둠

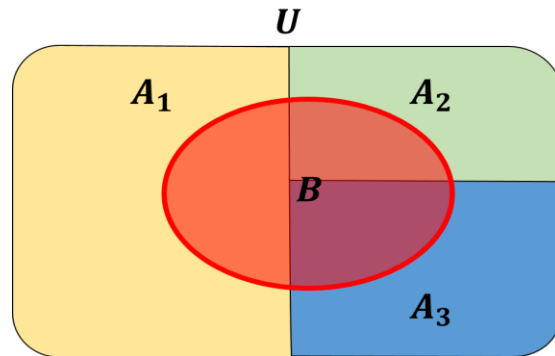


Fig 4. 전체 확률 법칙을 이루는 벤다이어그램

$$\begin{aligned}
 \text{사후확률} \quad P(A_i|B) &= \frac{P(A_i \cap B)}{P(B)} = \frac{P(A_i)P(B|A_i)}{P(B)} = \frac{\text{사전확률} \quad P(A_i) \quad \text{데이터가 나올 확률 (우도)} \quad P(B|A_i)}{\text{관찰된 증거 (A}_i\text{에 대한 정수)} \quad \sum_{i=1}^N P(A_i)P(B|A_i)}
 \end{aligned}$$

➤ 베이즈 정리 (Bayes' Theorem)

- 베이즈 정리를 통해 변수들의 확률 갱신 및 인과관계 추정을 표현
- 조건부확률과 전체 확률 법칙을 바탕으로 둠

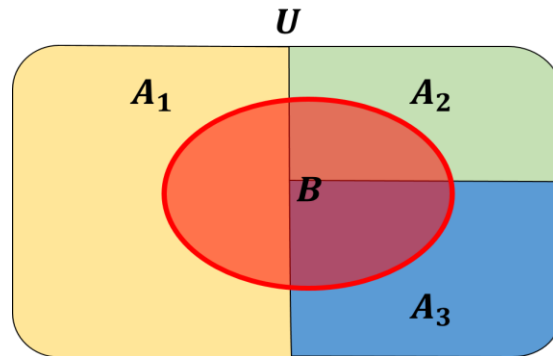


Fig 4. 전체 확률 법칙을 이루는 벤다이어그램

$$\underbrace{P(A_i|B)}_{\text{결과가 일어났을 때 특정 원인으로 인한 것일 확률}} = \frac{P(A_i \cap B)}{P(B)} = \frac{\underbrace{P(A_i)}_{\text{원인}} \underbrace{P(B|A_i)}_{\text{특정 원인으로 인해 결과 B가 나올 확률}}}{\underbrace{P(B)}_{\text{결과}}} = \frac{\boxed{P(A_i)} \boxed{P(B|A_i)}}{\boxed{\sum_{i=1}^N P(A_i)P(B|A_i)}}_{\text{결과 B가 관찰될 확률}}$$

➤ 장점과 효용

베이지안 네트워크의 장점

- 불확실성의 확률 분포 표현 가능
- 복잡한 시스템을 간단히 모사 가능
- 인과관계의 사슬 고리 형태로 **불완전한 정보**로 결과를 도출
- 정량적, 정성적 정보를 동시에 반영
- 믿음의 갱신과 학습을 통한 추가적 정보 반영 가능
- 결과의 원인을 진단 가능
- 그래픽 표현으로 의사소통 및 결정을 위한 이해를 도움

북한 핵물질생산량 추정에서의 효용

- 불확실한 북한 핵물질 생산량 추정 결과의 분포 범위를 제시
- 불완전한 북한 핵물질에 대한 정보를 통한 추정 가능
- 전문가 추정, 인공위성 사진 정보 등 다양한 형식의 정보를 반영 가능
- 북한 핵활동에 대한 새로운 정보를 반영한 갱신 가능
- 비전문가의 이해와 핵환산 방지 대책 결정 등의 의사 결정을 지원 가능

3. 네트워크 모델링

▶ 모델 기본 정보

- Von Hippel^c의 북한 핵물질 생산량 추정 방법을 기반으로 함
- 11개의 부분 모델로 구성
 - Top-down 모델 (3개): Pu 보유량, 고농축 우라늄 보유량, 저농축 우라늄 보유량
재처리 손실, 농축도, 변환 손실 등을 고려
 - Bottom-up 모델 (6개): 1945~2018년까지를 6개의 기간으로 구분
채광 능력, 채광 효율, 원광 수출 비율, 품위, 정련 효율 등을 고려
 - 결과 통합 모델 (2개): 정광 추정량, 원광 추정량

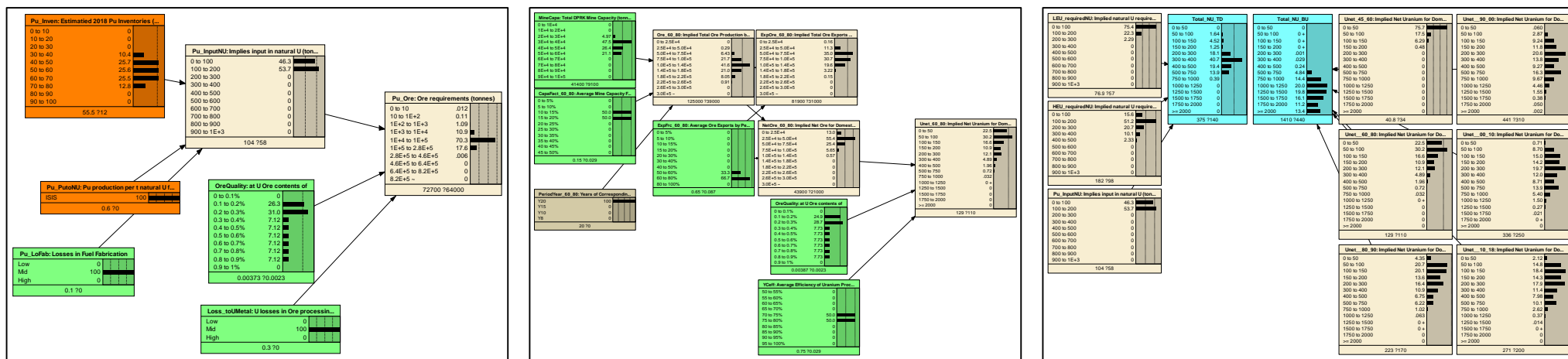


Fig 5. 부분 모델 - Top-down Pu 보유량(좌), Bottom-up 1960~80년(중), 정광 추정량(우)

^c D. F. Von Hippel, "Methods for Refining Estimates of Cumulative DRPK Uranium Production," Journal for Peace and Nuclear Disarmament, vol. 2, no. 2, pp. 555-585, 2019/07/03 2019.

3. 네트워크 모델링

➤ Von Hippel 연구 재현^d

- Von Hippel: 변수 목록과 각 변수에 대한 최소, 중앙, 최대값을 제공
- 변수 사이의 관계와 관계식을 역추정

Table 2. Top-down 계산 재현 정리

번호	구분	변수	계산법	임의값		
				Min	Central	Max
01	Pu 요구량	Estimated 2018 Pu Inventories(kg)	From Reference	36	55	75
02		Pu production per 1 natural U feed to Yongbyon Rxc	ISIS	0.6		
03		Losses in Fuel Fabrication	Assumption	0.1	0.1	0.1
04		Implies input in natural U (tonnes) at U Ore contents of	=01/02/(1-03)	66.7	101.9	138.9
05		U losses in Ore processing and conversion to U metal for YB Rxc	Assumption	0.0	0.0	0.0
06		U losses in Ore processing and conversion to U metal for YB Rxc	Assumption	0.3	0.3	0.3
07		Ore requirements (tonnes)	=04/05/(1-06)	10582	58201	132275
08		Estimated 2018 HEU Inventories (kg)	From Reference	300	600	900
09	Assumed %U-235 in enrichment tails	Assumption	0.3	0.4	0.5	
10	Conversion Losses, Enriched UF6 to HEU metal	Assumption	0.1	0.1	0.1	
11	Tonnes Natural U in Feed for HEU Production	WISE Calculator	0.2	0.2	0.4	
12	implied tonnes natural U feed for HEU Production	=08*11/(1-10)	61.5	156.7	401.9	
13	Losses in a conversion from yellowcake to UF6	Assumption	0.1	0.1	0.1	
14	implied input in natural U (tonnes)	=12/(1-13)	64.7	164.9	423.0	
15	U losses in ore processing and conversion to yellowcake	Assumption	0.2	0.2	0.2	
16	Implied natural U requirements in ore (tonnes) at U Ore contents of	=14/(1-15)	80.9	206.2	528.8	
17	U losses in ore processing and conversion to yellowcake	Assumption	0.0	0.0	0.0	
18	Ore requirements (tonnes)	=16/17	8989	82471	352521	
19	Estimated LEU needed for ELWR core plus additional loadings (kg LEU)	Hecker, 2010	4000.0	5000.0	6000.0	
20	Assumed %U-235 in enrichment tails	Assumption	0.3	0.4	0.5	
21	Conversion Losses, Enriched UF6 to LEU	Assumption	0.1	0.1	0.1	
22	Tonnes Natural U in Feed for HEU Production	WISE Calculator	0.007	0.013	0.014	
23	implied tonnes natural U feed for LEU Production	=19*22/(1-21)	29.7	67.9	89.7	
24	Losses in a conversion from yellowcake to UF6	Assumption	0.1	0.1	0.1	
25	implied input in natural U(tonnes)	=12/(1-13)	31.2	71.5	94.4	
26	U losses in ore processing and conversion to yellowcake	Assumption	0.2	0.2	0.2	
27	Implied natural U requirements in ore (tonnes)	=14/(1-15)	39.1	89.3	118.0	
28	at U Ore contents of	Assumption	0.0	0.0	0.0	
29	Ore requirements (tonnes)	=16/17	4340	35734	78670	
30	Implied total minimum total natural U requirements based on above (tonnes)	=04*16+27	186.6	397.4	785.7	

Table 3. Bottom-up 계산 재현 정리

기호	계산법	변수	시작년도	마감년도	기간 (T)	임의값					
						Min	Central	Max			
C	Assumption	Total DPRK Mine Capacity (tonnes ore per annum, maximum historical capacity)	-	-	-	29000	39000	58000			
F	Assumption	Average Mine Capacity Factor by Period (Relative to Maximum Historical Capacity)	1945	1960	15	0.05	0.07	0.1			
			1960	1980	20	0.1	0.15	0.2			
			1980	1990	10	0.2	0.3	0.4			
			1990	2000	10	0.3	0.4	0.5			
			2000	2010	10	0.2	0.3	0.4			
			2010	2018	8	0.2	0.3	0.4			
			1945	1960	15	21750	40950	87000			
O	=C*T*F	Implied Total Ore Production by Period (tonnes)	1960	1980	20	58000	117000	232000			
			1980	1990	10	58000	117000	232000			
			1990	2000	10	87000	156000	290000			
			2000	2010	10	58000	117000	232000			
			2010	2018	8	46400	93600	185600			
			1945	1960	15	1	0.9	0.8			
			1960	1980	20	0.8	0.65	0.5			
k	Assumption	Average Ore Exports by Period (% of Output)	1980	1990	10	0.5	0.4	0.3			
			1990	2000	10	0.15	0.1	0.05			
			2000	2010	10	0.15	0.1	0.05			
			2010	2018	8	0.15	0.1	0.05			
			1945	1960	15	21750	36855	69600			
			1960	1980	20	46400	76050	116000			
			1980	1990	10	29000	46800	69600			
Oout	=O*k	Implied Total Ore Exports by Period	1990	2000	10	13050	15600	14500			
			2000	2010	10	8700	11700	11600			
			2010	2018	8	6960	9360	9280			
			1945	1960	15	0	4095	17400			
Onet	=O*(1-k)	Implied Net Ore for Domestic Use by Period	1960	1980	20	11600	40950	116000			
			1980	1990	10	29000	70200	162400			
			1990	2000	10	73950	140400	275500			
			2000	2010	10	49300	105300	220400			
			2010	2018	8	39440	84240	176320			
			p	Assumption	Average Ore Content (% U)	-	-	-	0.0015	0.0025	0.009
			e	Assumption	Average Efficiency of Uranium Processing to Yellowcake	-	-	-	0.7	0.75	0.8
Unet	=Onet*p*e	Implied Net Uranium for Domestic Use by Period (tonnes U)	1945	1960	15	0	7.678125	125.28			
			1960	1980	20	12.18	76.78125	835.2			
			1980	1990	10	30.45	131.625	1169.28			
			1990	2000	10	77.6475	263.25	1983.6			
			2000	2010	10	51.765	197.4375	1586.88			
			2010	2018	8	41.412	157.95	1269.504			

^d S. Jeong, H. Choe, J. H. Do, and H. Seo, "Building a Nonproliferation and Safeguards Dynamics Model for Estimating Cumulative Uranium Production from Denaturalization Perspective," Korea Institute of Nuclear Safety, KINAC/IR-016/2020-2020, 2020, pp. 14-29.

➤ 구조 구축

- 노드 - Von Hippel이 제시한 변수를 차용
- 링크 - 재현 연구에서 역추정한 관계식을 반영

Table 4. Pu 보유량의 Top-down 계산 재현 정리

번호	구분	변수	계산법	입력값		
				Min	Cental	Max
01	Pu 요 구 량	Estimated 2018 Pu Inventories(kg)	From Reference	36	55	75
02		Pu production per t natural U feed to Yongbyon Rx	ISIS	0.6		
03		Losses in Fuel Fabrication	Assumption	0.1	0.1	0.1
04		Implies input in natural U (tonnes)	=01/02/(1-03)	66.7	101.9	138.9
05		at U Ore contents of	Assumption	0.0	0.0	0.0
06		U losses in Ore processing and conversion to U metal for YB Rx	Assumption	0.3	0.3	0.3
07		Ore requirements (tonnes)	=04/05/(1-06)	10582	58201	132275

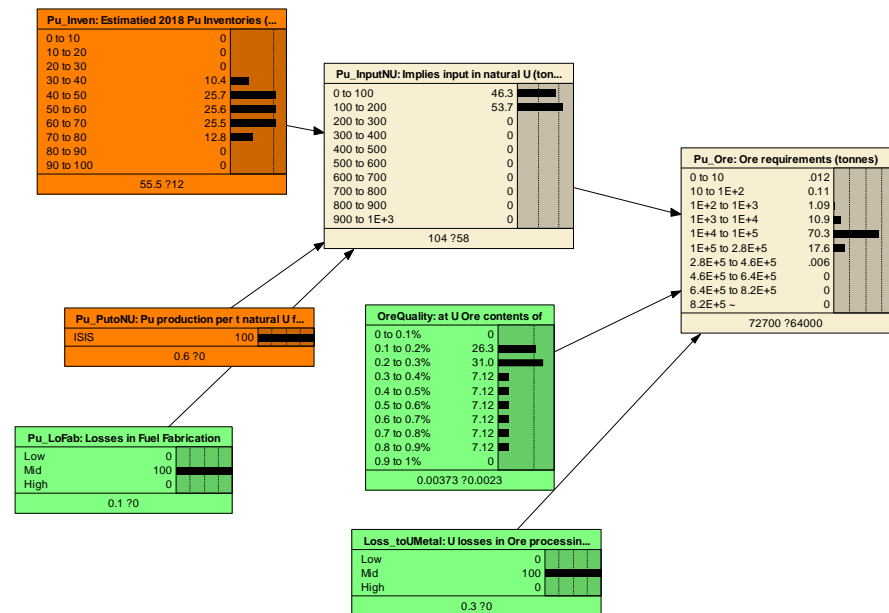


Fig 6. Pu 보유량의 Top-down 계산 베이저안 네트워크 모델

➤ 상태 및 확률 할당

- 최소값, 중앙값, 최대값을 반영함
- 최소-최대를 포함한 값의 범위를 상태로 구분
 - 3개 (Low, Mid, High): 절대값에 비해 범위가 좁은 경우 (Tail의 농축도 등)
 - 10개: 핵물질량 관련 노드 및 절대값에 비해 범위가 넓은 경우 (우라늄 품위 등)
 - 13개: Bottom-up으로 계산된 우라늄 원광의 량

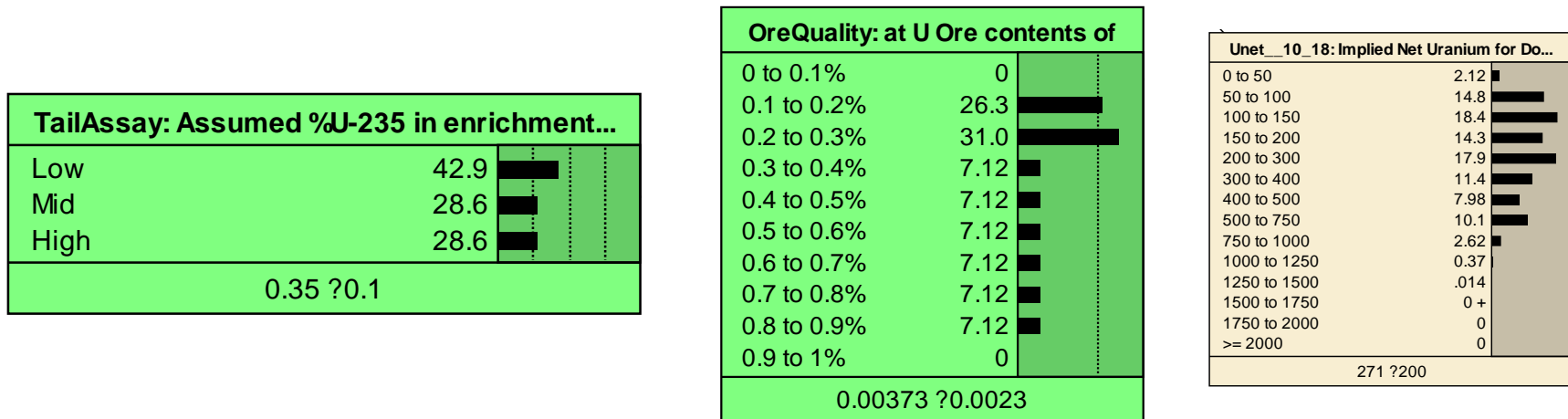


Fig 7. 각 노드의 상태 할당 예시

▶ 상태 및 확률 할당

- 최소값, 중앙값, 최대값을 반영함
- 뿌리노드^e의 확률 할당
 - 최소값-중앙값, 중앙값-최대값 사이의 확률을 0.5로 하는 계단 분포를 가정
 - 하나의 값으로 주어진 경우, 가운데 상태의 확률을 1로 가정
- 기타 노드는 계산식을 기반한 샘플링으로 각 상태의 확률을 도출

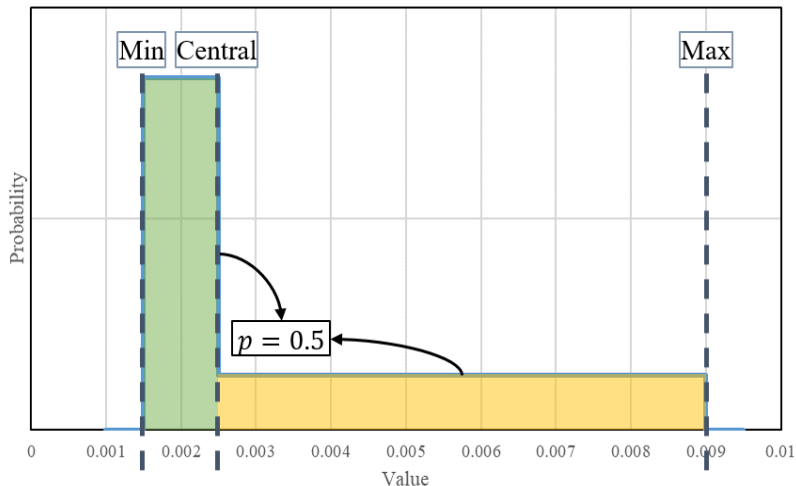


Fig 8. 최소, 중앙, 최대치를 이용한 확률 분포 가정

$$Pu_InputNU (Pu_Inven, Pu_PutoNU, Pu_LoFab) = Pu_Inven/Pu_PutoNU/(1-Pu_LoFab)$$

Fig 9. BN 프로그램 (Netica™) 내 확률 샘플링을 위한 계산식 입력 예시

^{e)} 뿌리노드(Root node): 해당 노드를 향해 이어지는 링크가 없는 가장 기본의 노드

➤ 결과 확률 분포

- 믿음의 갱신을 통해 북한의 누적 핵물질 생산량을 **확률분포**로 추정
- 두 방식의 결과가 **겹치는 면적** 내 실제 값이 존재할 확률이 높을 것으로 추측

Table 5. 베이지안 네트워크를 통해 추정된 북한 누적 핵물질 생산량 결과

대상 물질	계산 방식	Min (95% Confidence)	Central (Median)	Max (95% Confidence)
정광	Top-down	110*	360	712
	Bottom-up	615	1,383	2,203
원광	Top-down	28,423	212,654	536,053
	Bottom-up	291,612	498,008	660,894

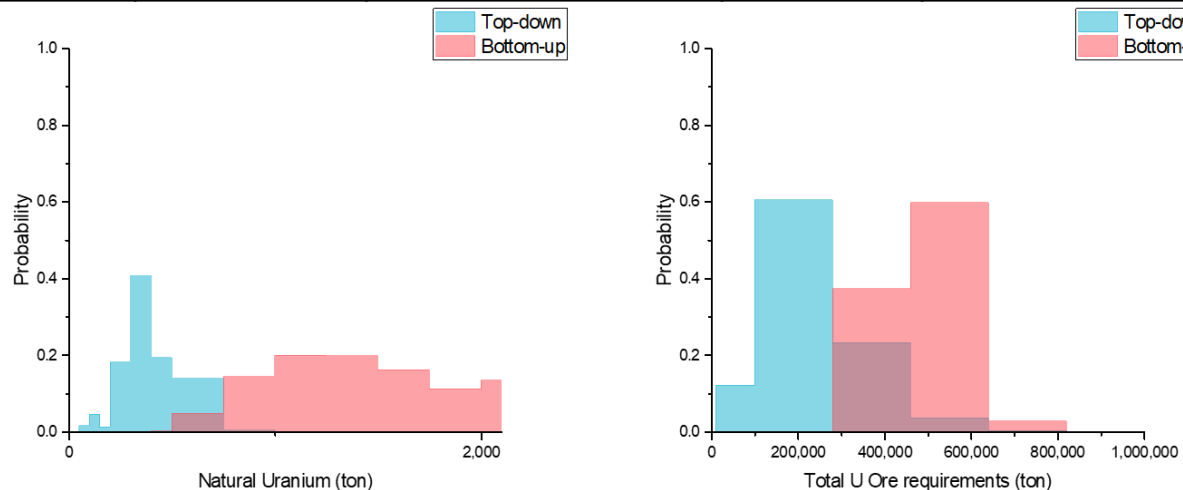


Fig 10. 북한 누적 핵물질 생산량에 대한 확률 분포

➤ Von Hippel 연구 결과의 비교

Table 6. Von Hippel 결과에 대한 본 연구 결과의 분율

대상 물질	계산 방식	결과 비교 비율		
		Min	Median	Max
정광	Top-down	0.59	0.91	0.91
	Bottom-up	2.89	1.66	0.32
원광	Top-down	1.19	1.21	0.95
	Bottom-up	1.43	1.12	0.68

- 발생확률이 매우 낮은 95%의 신뢰구간 외부를 제외함으로써 누적 핵물질 생산량의 추정 범위가 좁아짐
- 확률분포의 결합을 통한 계산을 통해 중앙값이 변화
- 프로그램 내 계산식의 조건부확률표 변환 과정 중 샘플링에서의 상태 구간 내 균등 확률 가정으로 확률 분포의 기울기가 급격한 구간 및 분포의 끝 부분에서의 왜곡이 발생

➤ Summary

- 전체 핵주기를 고려하여 Top-down, Bottom-up 양방향으로부터 북한의 누적 정광 및 원광 생산량을 추정하는 **베이지안 네트워크를 개발**
- 베이지안 네트워크를 이용하여 북한 핵물질 생산량 추정의 불확실성을 **확률분포로 표현**할 수 있고, 추정의 **정밀성과 정확성**을 높일 수 있음

➤ Future Work

- 추가 **문헌조사** 및 **전문가 판단(Expert Elicitation)**을 통한 변수 선정 및 확률 할당의 신뢰성 향상
- 다양한 시나리오의 **케이스 연구**를 통한 모델의 예측력 및 적용성 **검증**
- **동적 시뮬레이션** 모델의 보완으로의 활용을 위한 **연계** 방안 개발

감사합니다

Q&A