

Wide Residual Networks

Sergey Zagoruyko, Nikos Komodakis

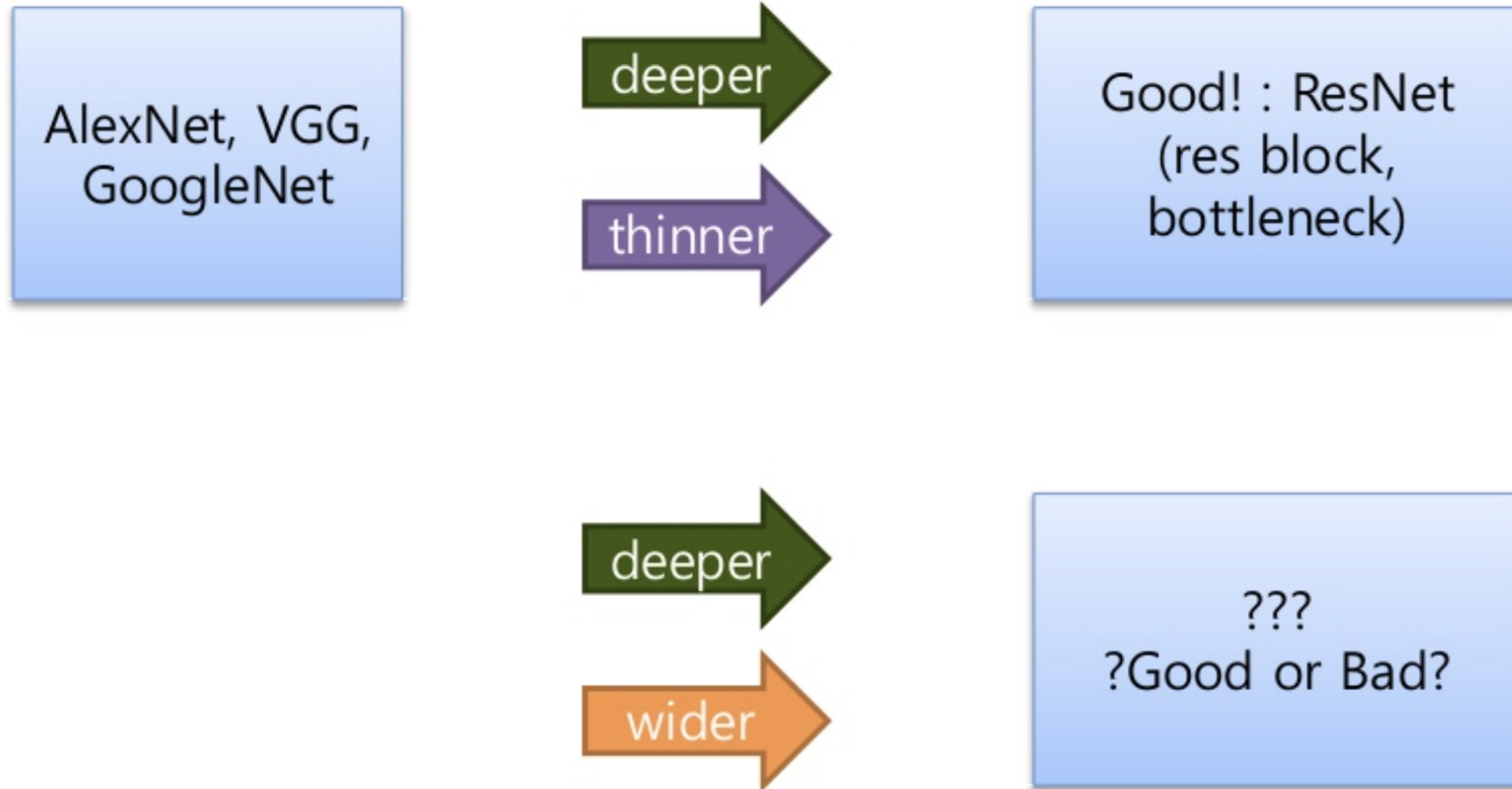
2021. 07. 08.

이동건

Contents

- Introduction
 - Contribution
 - Width vs Depth in residual Networks
 - Dropout
- Representation
- Wide Residual Networks
- Experimental Result
- Conclusions
- References

Introduction



Contributions

- ResBlock의 여러 변형을 실험을 수행하여 확인
- 새로운 widened architecture를 제안 (성능 향상 확인)
- deep residual network 내에서 dropout을 활용하는 방법 제안
- 새롭게 제안하는 방법이 여러 dataset에서 향상된 accuracy와 속도로 SOTA

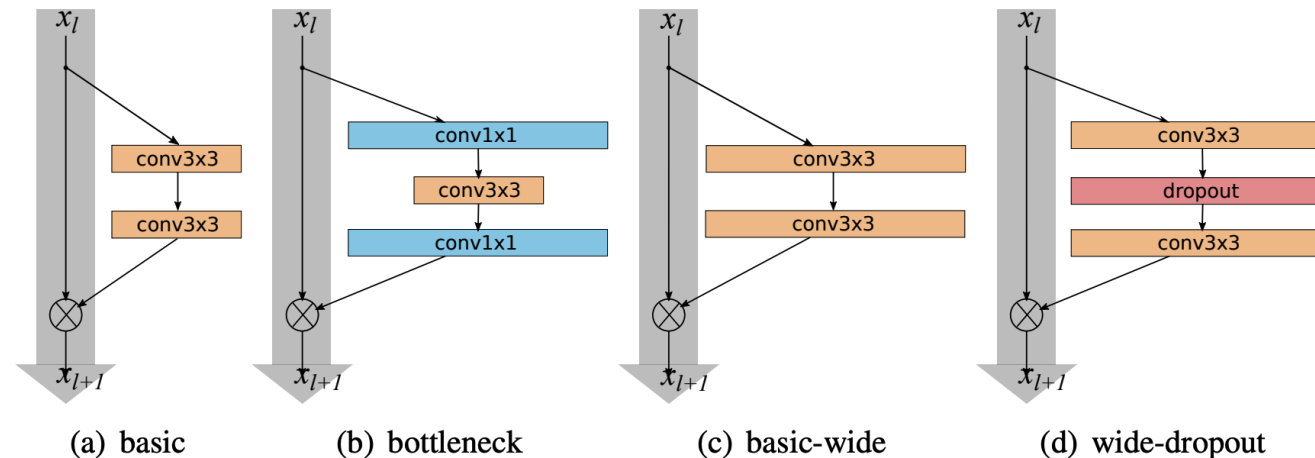


Figure 1: Various residual blocks used in the paper. Batch normalization and ReLU precede each convolution (omitted for clarity)

Width vs Depth in residual Networks

- ResNet은 shortcut connection으로 많은 layer을 학습 할 수 있도록 하였다.
- 하지만 망이 깊어지면 깊어질 수록 의미있는 정보(context)를 갖는 필터의 수의 비가 적어지는 문제가 발생하게 되었다.
- 때문에 저자는 Block의 수를 증가시키지 않고, Residual Block의 Channel을 증가시키는 방향으로 연구를 시도하였다.
- 이 논문에서는 Residual Block을 (a), (c)의 구조와 같이 3x3 컨볼루션이 두 개로 이루어진 경우를 $B(3,3)$ 으로 표기하였다.
- 이와 마찬가지로 (b)의 경우는 $B(1,3,1)$ (d)는 $B(3,1,3)$ 으로 표기가 가능하다.

Wide Residual Networks

- 기본적인 residual block 은 다음과 같다.

$$\mathbf{x}_{l+1} = \mathbf{x}_l + F(\mathbf{x}_l, W_l)$$

- x_{l+1} 과 x_l 은 network에서 l 번째 unit의 input과 output을 의미하며,
- F 는 residual function 이다. (이 때의 block의 parameter는 W_l 이다.)

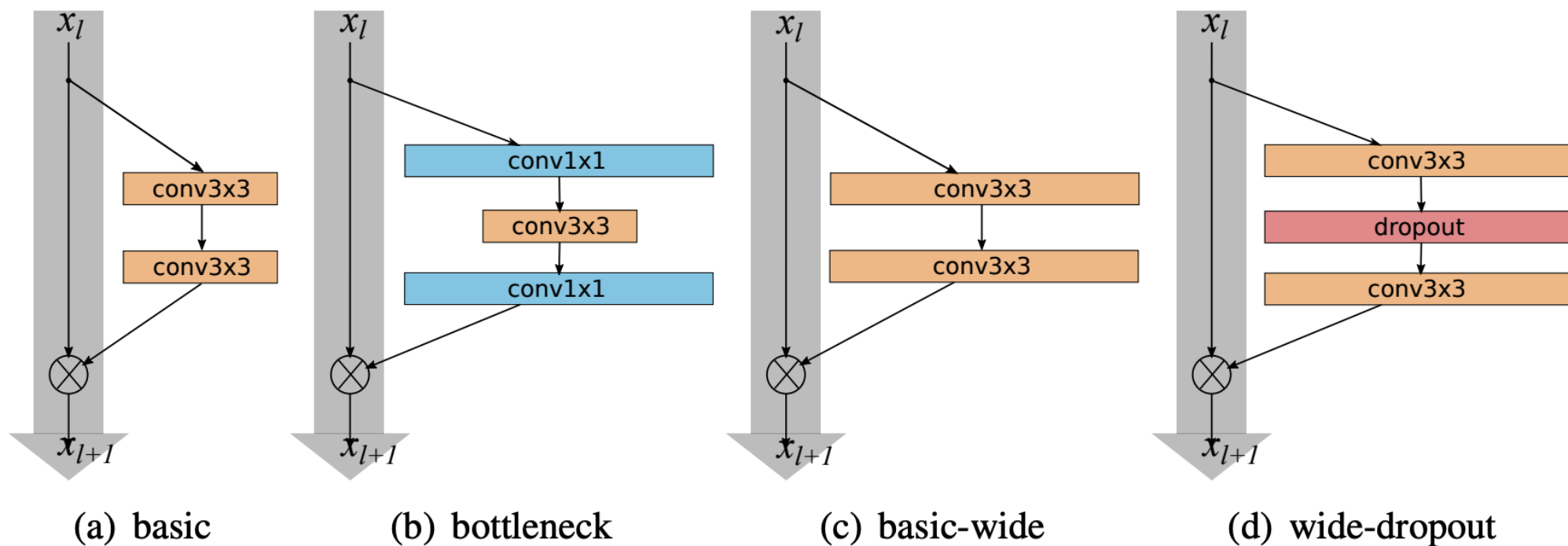


Figure 1: Various residual blocks used in the paper. Batch normalization and ReLU precede each convolution (omitted for clarity)

- Residual network는 연속적으로 쌓여진 residual block으로 구성된다.

- residual block 는 2가지 형태의 block으로 구성
 - **basic**: $[conv3 \times 3] - [conv3 \times 3]$
 - 연속된 3x3 convolution으로 구성되며, batch normalization과 ReLU가 앞선 convolution에 적용되는 구조
 - **bottleneck**: $[conv1 \times 1] - [conv3 \times 3] - [conv1 \times 1]$
 - 하나의 3×3 convolution은 차원을 감소하고 증가시키는 1×1 convolution layer에 둘러싸여 있는 구조
- Original ResNet 과 다르게 WRN은 BN, ReLU 적용 순서를 다르게 하였다.
 - *origin*: $conv - BN - ReLU$
 - **our**: $BN - ReLU - conv$
 - 이렇게 하면 더 빠르게 학습이 되고 더 좋은 결과를 얻는 것을 알 수 있다.

- Residual block 을 강건(?)하게 만들 수 있는 가장 쉬운 방법은 무엇일까?
 - block 마다 conv-layer 를 추가한다.
 - 더 넓은 conv layer 를 만들기 위해 출력 feature 크기를 키운다.
 - filter 크기를 늘린다.
- 작은 filter 를 쓰는 것이 여러모로 좋다는 사실은 이미 잘 알려진 사실이다. (그래서 이를 늘리기는 부담이다.)
 - 따라서 우리는 3×3 이상 크기를 가지는 filter 를 사용하는 것을 포기한다.

Dropout

- Dropout은 Coadaptive하고 overfitting을 막기 위해 많은 네트워크에 적용되어 왔다.
- 추가적으로 Internal Covariate Shift 이슈를 막기위한 Batch Norm 과 같은 방법들도 연구가되었는데, 이 방법들은 Regularizer의 효과도 볼 수 있다.
- 이 논문에서는 Residual Block의 컨볼루션 사이에 Dropout(Dorp rate 0.3)을 사용한다.

Representation of Residual block

| group name | output size | block type = $B(3, 3)$ |
|------------|----------------|---|
| conv1 | 32×32 | $[3 \times 3, 16]$ |
| conv2 | 32×32 | $\begin{bmatrix} 3 \times 3, 16 \times k \\ 3 \times 3, 16 \times k \end{bmatrix} \times N$ |
| conv3 | 16×16 | $\begin{bmatrix} 3 \times 3, 32 \times k \\ 3 \times 3, 32 \times k \end{bmatrix} \times N$ |
| conv4 | 8×8 | $\begin{bmatrix} 3 \times 3, 64 \times k \\ 3 \times 3, 64 \times k \end{bmatrix} \times N$ |
| avg-pool | 1×1 | $[8 \times 8]$ |

Table 1: Structure of wide residual networks. Network width is determined by factor k . Original architecture [13] is equivalent to $k = 1$. Groups of convolutions are shown in brackets where N is a number of blocks in group, downsampling performed by the first layers in groups conv3 and conv4. Final classification layer is omitted for clearance. In the particular example shown, the network uses a ResNet block of type $B(3, 3)$.

- $B(3, 3)$ 의 경우 구조가 위와 같이 정의된다.

- WRN 에서는 기존 ResNet에 2개의 추가적인 factor 가 존재한다.
 - l : block 에 포함된 conv 갯수
 - k : conv 레이어 내에서 feature 수의 배수.
 - 예를 들어 $l = 2, k = 1$ 은 <<basic>> block 을 의미하게 된다.

- 다음으로 residual block 을 표현하는 방법은 다음과 같다.
- $B(M)$
 - M 은 kernel 크기로, 예를 들어 3 인 경우 3×3 을 나타낸다.
 - $B(3, 3)$ - original <<basic>> block
 - $B(3, 1, 3)$ - with one extra 1×1 layer
 - $B(1, 3, 1)$ - with the same dim. of all conv. <<stgaightened>> bottleneck
 - $B(1, 3)$ - the newtork has alternating $1 \times 1 - 3 \times 3$
 - $B(3, 1)$ - similar idea to the previous block
 - $B(3, 1, 1)$ - NiN style block

Representation of Network

WRN-28-2- $B(3,3)$

네트워크
이름

Depth
 n

Width
 k

3x3 conv 두개로
이루어진 구조

내부 conv층
개수 l

Experimental Result

1. Type of convolution in a block
 2. Number of convolutions per block
 3. Width of residual blocks
 4. Dropout in residual blocks
 5. ImageNet and COCO experiments
 6. Computational efficiency
- 실험 데이터 : CIFAR-10, CIFAR-100, SVHN, ImageNet

- 이 중 CIFAR-10,100 은 입력 이미지가 32×32 이고 클래스가 각각 10, 100 개
 - Data augmentation
 - 간단하게 horizontal flip 과 4 pixel 정도 padding 뒤 random crop 적용
 - 과하게 augmentation 을 적용하지 않음.

- SVHN 은 구글 스트리트 뷰 데이터
 - 이미지 전처리를 사용하지 않음.
 - 다만 입력 pixel 을 255 로 나누어 $[0 - 1]$ 정규화 수행
- ImageNet 은 실험을 해보니 앞단에 activation 을 두는 모델의 장점이 전혀 없어서 그냥 original resnet 모델을 사용
- 좀 더 자세한 사항은 논문을 참고

Exp 1. Type of convolution in a block

Residual Block의 구조 실험

- CIFAR-10 데이터를 이용해서 여러 종류의 block 타입을 확인해봄.
- 최대한 비슷한 크기의 param. 을 사용해서 결과를 얻도록 실험함.
- residual block의 구조를 바꾸어가면 실험 ($k = 2$ 를 유지.)
 - $WRN - 40 - 2$ 에서 실험
 - $B(1, 3, 1), B(3, 1), B(1, 3)$
 - $WRN - 28 - 2 - B(3, 3)$
 - $WRN - 22 - 2 - B(3, 1, 3)$

| block type | depth | # params | time,s | CIFAR-10 |
|--------------|-------|----------|--------|----------|
| $B(1, 3, 1)$ | 40 | 1.4M | 85.8 | 6.06 |
| $B(3, 1)$ | 40 | 1.2M | 67.5 | 5.78 |
| $B(1, 3)$ | 40 | 1.3M | 72.2 | 6.42 |
| $B(3, 1, 1)$ | 40 | 1.3M | 82.2 | 5.86 |
| $B(3, 3)$ | 28 | 1.5M | 67.5 | 5.73 |
| $B(3, 1, 3)$ | 22 | 1.1M | 59.9 | 5.78 |

Table 2: Test error (% , median over 5 runs) on CIFAR-10 of residual networks with $k = 2$ and different block types. Time column measures one training epoch.

- $B(3, 3)$ 이 가장 우수하지만,
 - 파라미터 수 대비 $B(3, 1)$ 과 $B(3, 1, 3)$ 도 나쁘지 않다.
- 성능상 큰 차이는 없으므로 이후 실험은 $B(3, 3)$ 만을 가지고 실험.

Exp 2. Number of convolutions per block

- ResBlock 내부의 Conv층의 개수
 - Block 내의 conv. layer 개수는 몇 개가 적당한가?
- $WRN - 40 - 2$ 에서 $l \in [1, 2, 3, 4]$ 로 변경하며 실험
 - 이 때 총 depth 는 유지. ($depth = 40$)

| l | CIFAR-10 |
|-----|----------|
| 1 | 6.69 |
| 2 | 5.43 |
| 3 | 5.65 |
| 4 | 5.93 |

Table 3: Test error (% , median over 5 runs) on CIFAR-10 of WRN-40-2 (2.2M) with various l .

- $l = 2$ 인 경우 성능이 가장 좋았다.
- 이후 실험에서는 $l = 2$ 로 고정한다.

Exp 3-1. Width of residual blocks

- 폭(width), 깊이(depth), 파라미터 개수(# of params) 실험
- WRN 의 다양한 변형 형태를 실험함.
 - k 는 2~12 로, $depth$ 는 16~40 실험

| depth | k | # params | CIFAR-10 | CIFAR-100 |
|-------|-----|----------|-------------|--------------|
| 40 | 1 | 0.6M | 6.85 | 30.89 |
| 40 | 2 | 2.2M | 5.33 | 26.04 |
| 40 | 4 | 8.9M | 4.97 | 22.89 |
| 40 | 8 | 35.7M | 4.66 | - |
| 28 | 10 | 36.5M | 4.17 | 20.50 |
| 28 | 12 | 52.5M | 4.33 | 20.43 |
| 22 | 8 | 17.2M | 4.38 | 21.22 |
| 22 | 10 | 26.8M | 4.44 | 20.75 |
| 16 | 8 | 11.0M | 4.81 | 22.07 |
| 16 | 10 | 17.1M | 4.56 | 21.59 |

Table 4: Test error (%) of various wide networks on CIFAR-10 and CIFAR-100 (ZCA pre-processing).

- 같은 $depth$ 에서는 $\rightarrow k$ 가 클수록 (넓을수록) 우수
- 같은 k 에서는 $\rightarrow depth$ 가 클수록 (깊을수록) 우수
- 같은 파라미터 수에는? $\rightarrow depth$ 와 k 가 제각각.
 - 최적의 깊이, 폭 고려가 필요하다.

Exp 3-2. Width of residual blocks

- 다른 Network들과 비교
 - 앞선 실험과 비슷한 경향
 - WRN이 우수함
 - 폭과 깊이의 적정점을 찾아냄

| | depth- k | # params | CIFAR-10 | CIFAR-100 |
|---------------------|------------|----------|-------------|--------------|
| NIN [20] | | | 8.81 | 35.67 |
| DSN [19] | | | 8.22 | 34.57 |
| FitNet [24] | | | 8.39 | 35.04 |
| Highway [28] | | | 7.72 | 32.39 |
| ELU [5] | | | 6.55 | 24.28 |
| original-ResNet[11] | 110 | 1.7M | 6.43 | 25.16 |
| | 1202 | 10.2M | 7.93 | 27.82 |
| stoc-depth[14] | 110 | 1.7M | 5.23 | 24.58 |
| | 1202 | 10.2M | 4.91 | - |
| pre-act-ResNet[13] | 110 | 1.7M | 6.37 | - |
| | 164 | 1.7M | 5.46 | 24.33 |
| | 1001 | 10.2M | 4.92(4.64) | 22.71 |
| WRN (ours) | 40-4 | 8.9M | 4.53 | 21.18 |
| | 16-8 | 11.0M | 4.27 | 20.43 |
| | 28-10 | 36.5M | 4.00 | 19.25 |

Table 5: Test error of different methods on CIFAR-10 and CIFAR-100 with moderate data augmentation (flip/translation) and mean/std normalization. We don't use dropout for these results. In the second column k is a widening factor. Results for [13] are shown with mini-batch size 128 (as ours), and 64 in parenthesis. Our results were obtained by computing median over 5 runs.

- $WRN - 28 - 10$ 모델이 $pre - act - ResNet - 1001$ 보다 0.92% 만큼 성능이 더 좋다. (동일한 batch size 128 로 학습)
- 참고로 batch 크기를 64로 했을 때 pre-act-ResNet 의 error는 4.64. (괄호 안 수치)

Exp 3-3. Width of residual blocks

- *ResNet* – 164 와 *WRN* – 28 – 10 의 크기 차이와 학습 난이도
 - #params 차이 : 1.7M vs 36.5M
 - 파라미터가 더 많은 *WRN* – 28 – 10이 *ResNet* – 164 보다 학습이 잘 됨.

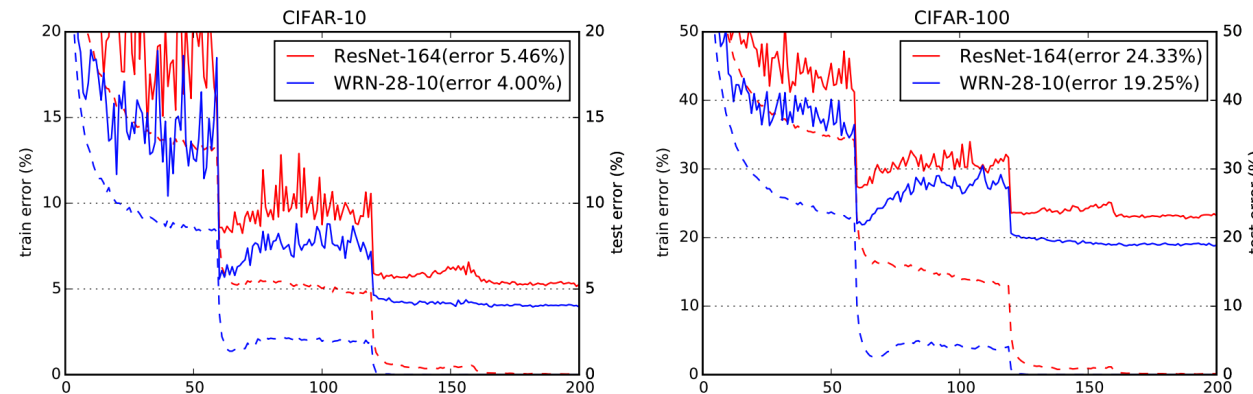


Figure 2: Training curves for thin and wide residual networks on CIFAR-10 and CIFAR-100. Solid lines denote test error (y-axis on the right), dashed lines denote training loss (y-axis on the left).

Exp 4. Dropout in residual blocks

- Dropout을 Residual Block에 적용해본 실험
- 대체로 dropout 사용이 유리함

| depth | k | dropout | CIFAR-10 | CIFAR-100 | SVHN |
|-------|-----|---------|-------------|--------------|------|
| 16 | 4 | | 5.02 | 24.03 | 1.85 |
| 16 | 4 | ✓ | 5.24 | 23.91 | 1.64 |
| 28 | 10 | | 4.00 | 19.25 | - |
| 28 | 10 | ✓ | 3.89 | 18.85 | - |
| 52 | 1 | | 6.43 | 29.89 | 2.08 |
| 52 | 1 | ✓ | 6.28 | 29.78 | 1.70 |

Table 6: Effect of dropout in residual block. (mean/std preprocessing, CIFAR numbers are based on median of 5 runs)

Exp 5. ImageNet & COCO experiments

- ResNet을 늘려서 Wide ResNet 구성한 실험
- non-bottleneck ResNet-18 과 ResNet-34 로 실험.
 - 여기에 WRN 을 적용해 본다.
 - *width* 를 1.0~3.0 으로 조정해 봄.
 - *width* 가 증가하면 성능이 올라감.
 - 그리고 파라미터 수가 비슷하면 성능도 얼추 비슷

| width | | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 3.0 |
|--------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| WRN-18 | top1,top5 | 30.4, 10.93 | 27.06, 9.0 | 25.58, 8.06 | 24.06, 7.33 |
| | #parameters | 11.7M | 25.9M | 45.6M | 101.8M |
| WRN-34 | top1,top5 | 26.77, 8.67 | 24.5, 7.58 | 23.39, 7.00 | |
| | #parameters | 21.8M | 48.6M | 86.0M | |

Table 7: ILSVRC-2012 validation error (single crop) of non-bottleneck ResNets for various widening factors. Networks with a comparable number of parameters achieve similar accuracy, despite having 2 times less layers.

| Model | top-1 err, % | top-5 err, % | #params | time/batch 16 |
|----------------------------|--------------|--------------|---------|---------------|
| ResNet-50 | 24.01 | 7.02 | 25.6M | 49 |
| ResNet-101 | 22.44 | 6.21 | 44.5M | 82 |
| ResNet-152 | 22.16 | 6.16 | 60.2M | 115 |
| WRN-50-2-bottleneck | 21.9 | 6.03 | 68.9M | 93 |
| pre-ResNet-200 | 21.66 | 5.79 | 64.7M | 154 |

Table 8: ILSVRC-2012 validation error (single crop) of bottleneck ResNets. Faster WRN-50-2-bottleneck outperforms ResNet-152 having 3 times less layers, and stands close to pre-ResNet-200.

- 가장 우수한 결과 모음; Object-Detection
 - COCO 버전의 경우
 - MultiPathNet + LocNet + WRN-34-2
 - 34 layer 밖에 없는데도 SOTA 찍음

| Dataset | model | dropout | test perf. |
|------------------------|---------------------|---------|--------------------------|
| CIFAR-10 | WRN-40-10 | ✓ | 3.8% |
| CIFAR-100 | WRN-40-10 | ✓ | 18.3% |
| SVHN | WRN-16-8 | ✓ | 1.54% |
| ImageNet (single crop) | WRN-50-2-bottleneck | | 21.9% top-1, 5.79% top-5 |
| COCO test-std | WRN-34-2 | | 35.2 mAP |

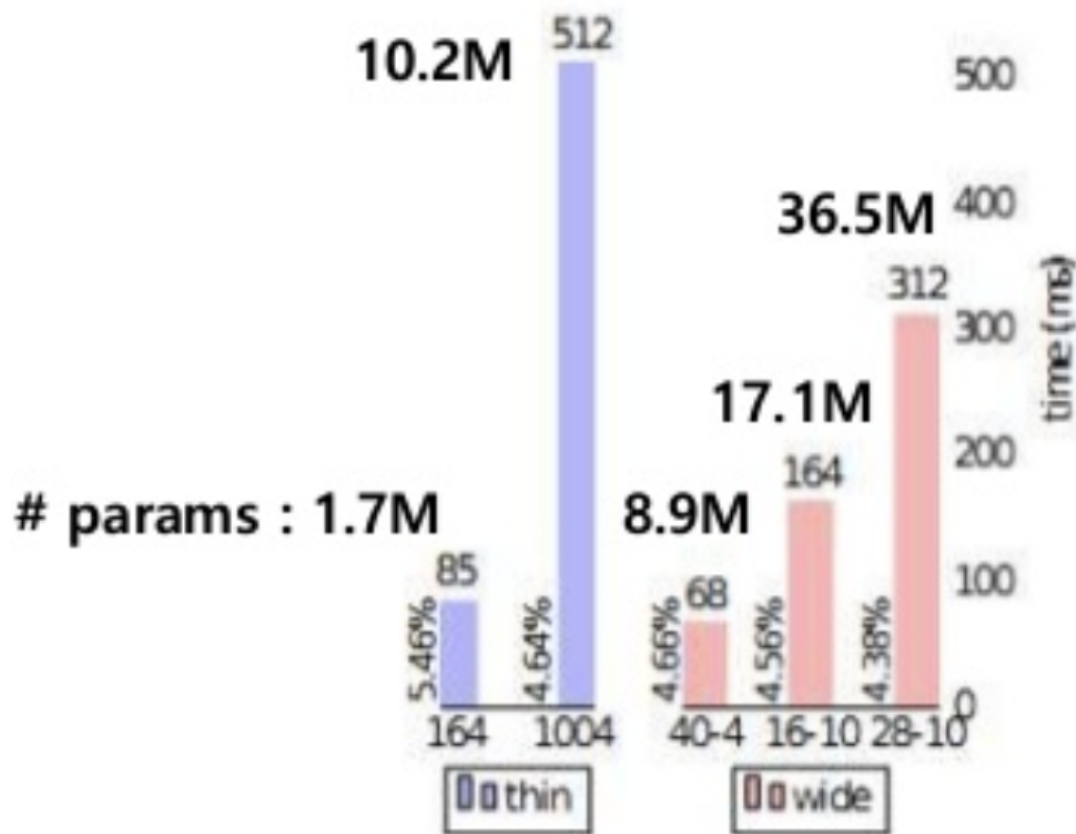
Table 9: Best WRN performance over various datasets, single run results. COCO model is based on WRN-34-2 (wider basicblock), uses VGG-16-based AttractionNet proposals, and has a LocNet-style localization part. To our knowledge, these are the best published results for CIFAR-10, CIFAR-100, SVHN, and COCO (using non-ensemble models).

Exp 6. Computational efficiency

계산 효율성 측정

- Thin & Deep Network (그냥 ResNet을 의미) 은 GPU 활용이 어려운데 기본적으로 sequential 연산이기 때문
 - 성능을 올리려면 당연히 최적화가 필요
- Titan.X 로 간단하게 forward+backward+update 연산을 계산해 봄
 - batch 크기는 32를 사용

- *ResNet* – 1001 과
WRN – 40 – 4 를 비교
 - 비슷한 정확도를 보임
 - 8배의 속도 차이



Conclusions

- 여러 가지 ResBlock 구조에 대한 고찰
- 깊이와 폭을 동시에 고려
- Dropout과 ResBlock을 조합하는 새로운 방법
- 우수한 결과
- 폭이 넓은 구조가 계산에 유리함을 실험으로 증명

References

1. [Wide Residual Networks](#)
2. ['Paper Summarization.' - norman3 & github](#)
3. ['Review Wide Resnet' - Woojin Jeong - slideshare](#)
4. [AiRLab. Research Blog — Wide Residual Networks](#)
5. [\[논문 읽기\] WRN\(2016\) 리뷰, Wide Residual Networks](#)
6. [cumulu-s.tistory.com](#) : [paper review](#) & [code review](#)
 - [szagoruyko/wide-residual-networks](#) & [Wide ResNet | PyTorch](#)
 - [PeterKim1/paper code review/7. Wide Residual Networks\(WRN\)](#)
 - [J911/WRN-pytorch](#)